This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

+ *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.

+ *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.

+ *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.

+ *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página `http://books.google.com`

A. GANOT

TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
GIFT OF
W. Hilman
Class

TRATADO ELEMENTAL

DE FÍSICA

TRATADO

ELEMENTAL

DE FÍSICA

POR A. GANOT

VIGÉSIMA PRIMERA EDICIÓN

ENTERAMENTE REFUNDIDA Y REDACTADA DE NUEVO

Conforme á los más recientes programas universitarios

POR G. MANEUVRIER

Alumno que fué de la Escuela normal superior
Licenciado en ciencias físicas y naturales
Vice-director del Laboratorio de experimentos (Física) en la Sorbona

VERSIÓN ESPAÑOLA

POR

FRANCISCO GUTIÉRREZ BRITO

Comisionado por el gobierno español
para el estudio de la enseñanza de lenguas en Francia

ESTA EDICIÓN COMPRENDE:

I. — EN LETRA GRUESA

La Física realmente elemental, que se exige en la preparación al Bachillerato,
para el ingreso en la Escuela Central de Ingenieros civiles de París,
la de Montes y la Militar de Saint-Cyr.

II. — EN LETRA MÁS PEQUEÑA

Los complementos indispensables á los que desean adquirir conocimiento más extenso
de Física, según se exige para el ingreso
en las Escuelas Politécnica y Normal Superior de Francia;
un resumen de Óptica superior y de Sacarimetría para uso de los estudiantes en Medicina
y Farmacia,
nociones de Meteorología y Climatología, y una colección de problemas
con sus soluciones.

1025 GRABADOS EN EL TEXTO Y 2 LÁMINAS DE COLOR

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

PARIS

LIBRERÍA DE LA Vda DE CH. BOURET
23, RUE VISCONTI, 23

LIBRERÍA DE HACHETTE Y Cia
79, BOUL. SAINT-GERMAIN, 79

1897

Propriedad del Editor.

QC21
G37

Guillermo Hileman

TRATADO ELEMENTAL

DE FÍSICA

LIBRARY UNIVERSITY

LIBRO I

MATERIA, MOVIMIENTO Y FUERZAS

CAPÍTULO PRIMERO

NOCIONES PRELIMINARES.

1. **Materia, cuerpo, propiedades de los cuerpos. — Fenómenos físicos y químicos.** — El hombre no puede existir sin ser afectado continuamente por infinidad de acciones exteriores, que ejercen sobre él los objetos y seres vivos que le rodean, es decir, los *cuerpos materiales* ó la *materia* del Universo.

Todo cuerpo está caracterizado por el conjunto de sus *propiedades*, esto es, por sus diversos modos de actuar en las diferentes circunstancias en que se encuentra colocado. Las manifestaciones de estos modos de acción constituyen los *fenómenos* naturales ó sencillamente *fenómenos* [1].

Estos fenómenos son de dos clases. Unos sólo subsisten en las circunstancias que los han causado : llámase á estos *fenómenos físicos*. Así, una piedra que se abandona en el aire cae al suelo. El agua, que existe normalmente en la atmósfera como vapor, puede volver á la tierra formando lluvia ó nieve. Los metales se dilatan ó se contraen según están expuestos al calor ó al frío. La piedra imán, que no ejerce acción ninguna sobre una aguja de cobre, atrae ó rechaza la de acero imantado que se le acerca. El ámbar y el vidrio frotados previamente con un paño de lana, atraen las barbas de pluma y otros cuerpos ligeros.

1. Esta palabra no tiene en la ciencia el mismo significado que en el lenguaje vulgar, pues comunmente designa un hecho raro y sorprendente ó bien un objeto monstruoso. Se deriva del griego φαινόμενον, que significa *cosa que aparece*.

202535

Por el contrario, otros fenómenos, llamados *químicos*, determinan alteraciones profundas y duraderas en las propiedades de los cuerpos. Si se calienta mucho un pedazo de creta, ya no se observará una dilatación pasajera como en el caso de una barra metálica, sino que el cuerpo restante después del enfriamiento no tendrá del primitivo más que el aspecto exterior, pues habrá perdido las propiedades de la creta, adquiriendo las de un nuevo cuerpo, la cal viva. Análogamente, el hierro expuesto al aire húmedo cambia de aspecto, cubriéndose de otro cuerpo que se llama herrumbre.

2. **Objeto de la física.** — Si nos atuviéramos á la etimología del nombre, la *física*[1] abarcaría el estudio de todos los fenómenos *naturales*; pero esta ciencia ha limitado su objeto á fin de dominarlo y profundizarlo mejor. Dejando á las diferentes ramas de la *historia natural* los fenómenos relativos á los seres organizados, animales y vegetales, á la *astronomía* los fenómenos celestes, á la *mineralogía* la clasificación y las propiedades de los *cuerpos brutos* ó *minerales*, á la *geología* la historia de la costra terrestre y de las fases sucesivas de su lenta formación, y por fin á la *química* los fenómenos químicos, nuestra ciencia se ha reservado el estudio profundo de los fenómenos físicos.

Agreguemos que la línea de división es mucho más precisa entre la física y las ciencias naturales que entre la física y la química. Estas dos ciencias se relacionan en multitud de puntos, no sólo en su objeto, sino en su método y resultados generales. Por esto se les da el calificativo común de *Ciencias físicas*, en oposición con el de *Ciencias naturales*, que designa á las demás ramas del estudio de la naturaleza.

3. **Método físico ó experimental. — Leyes físicas.** — Una ciencia se define tanto por su método como por su objeto. La física se eleva al conocimiento completo de su objeto por tres grados sucesivos, que son los rasgos principales de su método : la *observación*, la *experimentación* y la *generalización*.

La *observación* consiste en examinar con cuidado un fenómeno en las circunstancias ordinarias de su producción y en determinar con exactitud estas circunstancias por complejas que sean.

La *experimentación* consiste en observar el mismo fenómeno en condiciones especiales de sencillez, preparadas de antemano, con objeto de aislar sucesivamente cada una de las circunstancias que de ordinario le acompañan en conjunto.

La experimentación es el rasgo verdaderamente distintivo del *método físico*, que á menudo recibe también el nombre de *método experimental*.

La *generalización* consiste en expresar por medio de un enunciado general y único el conjunto de los resultados adquiridos por la experimentación. Este enunciado constituye la *ley física*.

1. Del griego φύσις, naturaleza.

Un ejemplo único bastará para indicarnos la marcha de la ciencia.

La más vulgar observación nos revela la existencia del fenómeno de la caída de los cuerpos. Una piedra, ó cualquier otro objeto, se precipita hacia el suelo desde que se la suelta : luego todos los cuerpos caen. Nada es más fácil de observar. Pero ¿ cómo se efectúa este descenso? ¿Es igualmente rápido su movimiento en todos los instantes de su caída? Si la rapidez del descenso no es constante ¿ de qué manera varía según las alturas recorridas? ¿Un cuerpo pesado que no sea la piedra, abandonado á sí mismo en las mismas condiciones que ésta, adquirirá el mismo movimiento? ¿No se opone á la caída el aire atmosférico que el cuerpo atraviesa, no lo retarda, y cuánto? Estas particularidades, esenciales de conocer para saber de manera exacta *cómo caen los cuerpos*, no pueden ser averiguadas sino por medio de la experiencia : por ejemplo, se elevará sucesivamente el cuerpo grave á alturas cada vez mayores, midiéndose la duración de sus descensos sucesivos; ó bien se le hará caer dentro de un tubo privado de aire, para suprimir así la resistencia de la atmósfera.

De esta manera se llegará á tener un conocimiento absoluto del fenómeno, que permitirá predecir sus pormenores completos en un caso cualquiera dado *a priori*. La expresión general de las relaciones que existen entre este fenómeno y las mencionadas circunstancias diversas, constituye la *ley del descenso de los graves*, descubierta por Galileo y que se enuncia del siguiente modo :

Los espacios recorridos por un cuerpo que cae libremente en el vacío son proporcionales á los cuadrados de los tiempos que tardan en recorrerlos.

4. **Teorías físicas. — Antiguos fluidos imponderables. — Antiguos agentes físicos. — Física moderna.** — Imaginando ciertas hipótesis convenientemente formadas se puede llegar á enlazar unas con otras las diferentes leyes físicas que se refieren á una misma clase de fenómenos, de tal modo que después sea posible deducirlos unos de otros, por medio del razonamiento ó del cálculo, y aun descubrir nuevas leyes, susceptibles á su vez de comprobación experimental : de esta manera se constituye la *teoría física*[1] de la mencionada clase de fenómenos.

Una teoría física es esencialmente provisional, y hay que modificarla así que la experiencia contradice las consecuencias que de ella se pueden deducir. La historia de la física abunda en ejemplos de estas contradicciones, pues el concebir y adoptar, frecuentemente de modo prematuro, doctrinas generales, son necesidades innatas del espíritu humano..

Los primeros ensayos de explicación de los fenómenos naturales

1. Sin embargo, esta denominación se aplica también algunas veces, aunque impropiamente, á la explicación de ciertos fenómenos particulares en que no interviene ninguna hipótesis *a priori* : así se dice, pongamos como ejemplo, la *teoría del rocío*, la *teoría del arco-iris*, etc.

se encuentran en las mitologías y los libros sagrados de los pueblos antiguos. Los sacerdotes y los fundadores de religiones fueron los primeros físicos de las sociedades nacientes, así como sus primeros legisladores. Por lo demás, no se esforzaron mucho en observar los hechos, ni en raciocinar para explicarlos : casi toda su ciencia la sacaron de la imaginación, atribuyendo á cada efecto una causa sobrenatural é inventando una divinidad que tenía la misión especial de producirla. De esta manera fueron creados por los hombres los innumerables dioses del paganismo, espíritus del fuego, de la luz y de las tinieblas, del sol y de la luna, del mar, de los ríos y arroyos, de los vientos y de las estaciones del año, de la lluvia y del buen tiempo.

Este instinto de lo maravilloso y de lo sobrenatural se perpetuó á través de la antigüedad pagana hasta la edad media. Entonces tomó nueva forma y provocó las prácticas ocultas de los alquimistas, sus fórmulas misteriosas y sus singulares ideas sobre la constitución de los cuerpos. No obstante los progresos del método experimental, la influencia de esas doctrinas llegó hasta los tiempos modernos, como lo prueba el gusto por las explicaciones *a priori* dominante hasta los primeros años de este siglo y que ha producido el *flogístico* de los pasados químicos y los *fluidos imponderables* ó *agentes físicos* de los pasados físicos. La causa de los diferentes fenómenos se atribuía, no ya á personas, sino á entidades particulares, supuestas sin peso y llamadas *fluidos imponderables*. De esta manera se imaginó el *fluido luminoso*, el *calórico* ó *fluido calórico*, las *electricidades resinosa* y *vítrea* ó *fluidos eléctricos positivo* y *negativo*, los dos *magnetismos* ó *fluidos magnéticos*, *boreal* y *austral*.

Pero, así como los progresos de la razón humana habían hecho desaparecer los entes que determinaban según su voluntad la aparición de los fenómenos naturales, así el desarrollo de las ciencias experimentales ha hecho ver lo inútil de estos fluidos hipotéticos para explicar las leyes tan varias de la naturaleza. Hoy se admite la existencia de movimientos moleculares, que no son perceptibles individualmente por efecto de su extremada pequeñez; pero que afectan de otro modo nuestros sentidos, á consecuencia de su gran número y de su acumulación. Los transmite el *éter*, medio hipotético, que llena el espacio y penetra íntimamente todos los cuerpos, y nos hacen experimentar, según su amplitud ó su velocidad, la sensación de *calor* ó la de *luz*. Á ellos hay que atribuir probablemente — mediante un mecanismo que los electricistas descubren de día en día — los fenómenos tan curiosos y variados de la *Electricidad* y del *Magnetismo*. También se hacen depender hoy de estos movimientos moleculares las atracciones que parecen ejercerse entre los cuerpos, sea á las distancias extremadamente pequeñas de las moléculas, con el nombre de *Fuerzas moleculares*, sea á las distancias inmensas de los astros, con los de *Gravedad* ó *Pesantez* y de *Gravitación universal*.

5. **Divisiones de la obra.** — Como el cambio de lugar de los cuerpos unos respecto de otros, esto es, el *movimiento*, es el más sencillo de los fenómenos físicos, la enseñanza de esta ciencia debe empezar por el estudio abstracto del movimiento, por la *Mecánica*. Á nuestro objeto sólo cumple exponer aquí las nociones fundamentales de esta ciencia moderna.

Conforme al espíritu de la física contemporánea, aplicaremos primeramente los principios de la Mecánica al estudio del movimiento de los cuerpos graves (*Gravedad*) y á la del equilibrio de los líquidos (*Hidrostática*) y del equilibrio de los gases (*Neumática*). La *Acústica* ó ciencia del sonido nos suministrará después un ejemplo muy claro de los movimientos vibratorios de la materia que engendran fenómenos físicos y fenómenos fisiológicos. El estudio de estas vibraciones sonoras, que es fácil hacer accesibles á los sentidos, nos conducirá lógicamente al de las vibraciones luminosas (*Luz*) y de las caloríficas (*Calor*), que no es posible ver ni tocar individualmente y cuya existencia sólo nos es demostrada por el raciocinio. Luego expondremos los hechos fundamentales del *Magnetismo* y de la *Electricidad*, ciencias nuevas ó mejor dicho, renovadas desde hace poco, que todavía no pueden enlazarse naturalmente con las demás partes de la *Física* sino por la ley de la *conservación de la energía*, principio fundamental de la mecánica moderna.

Además, después del estudio de la Gravedad, que nos habrá familiarizado con los fenómenos físicos, intercalaremos la exposición del *Sistema de medidas* llamadas *absolutas*, organizado en 1881 por un Congreso internacional de físicos, así como la descripción de los principales instrumentos de medida, llamados *Instrumentos de precisión*, que se usan en física; hablaremos de la *capilaridad*, ó ciencia de los fenómenos capilares, después de la Hidrostática, á cuyas leyes parecen oponerse, y terminaremos este Tratado con la *Meteorología*, ciencia de los fenómenos atmosféricos, que exige la aplicación de las leyes y de los aparatos de las restantes partes de la Física.

CAPÍTULO II

PROPIEDADES GENERALES DE LA MATERIA.

6. **Estados físicos de los cuerpos.** — La materia impresiona nuestros sentidos ante todo por la diversidad de sus aspectos. Manifiéstasenos bajo tres tipos distintos, que se llaman *estados físicos* de los cuerpos. Son el *estado sólido*, el *líquido* y el *gaseoso*.

En el estado sólido tienen los cuerpos forma y volumen perfectamente determinados. Tales son las maderas, las piedras, los me-

tales. Llámaseles *cuerpos sólidos* ó sencillamente *sólidos*. En el estado líquido, los cuerpos tienen también un volumen determinado; pero carecen de forma propia, tomando la del vaso que los contiene. El agua es el más conocido de estos cuerpos. Llámaseles *líquidos*. En estado gaseoso, los cuerpos ya no tienen forma ni volumen propios y tienden constantemente á ocupar todo el espacio abierto ante ellos: se les llama *gases*. Así es el aire atmosférico.

Las partes de los sólidos son adherentes unas á otras, y no se puede separarlas sino desarrollando un esfuerzo más ó menos considerable. No sólo presentan estos cuerpos resistencia mayor ó menor á la ruptura, es decir, á la división completa de su agregado, sino también á los simples cambios de lugar de sus partes que produzcan deformaciones permanentes ó transitorias : esta propiedad característica del estado sólido se llama *cohesión*.

Condúcense los gases de manera totalmente opuesta. Parece que sus partes se rechazan mutuamente, pues no se las puede mantener en un espacio limitado sino aplicando por el exterior esfuerzo variable. Póngase una vejiga, deshinchada y cerrada, en un espacio privado de aire (el recipiente de la máquina neumática) y se la verá ensancharse de nuevo rápidamente, por efecto de la expansión de la escasa cantidad de gas que dentro de ella subsistía. Esta propiedad característica del estado gaseoso se denomina *expansibilidad*.

Por fin, el estado líquido es intermedio respecto de los otros dos. Las partículas líquidas no parecen atraerse como las sólidas, ni rechazarse como las gaseosas, resbalan fácilmente unas sobre otras, de modo que pueden mezclarse sin esfuerzo y cambiar de forma á voluntad sin modificación en el volumen. Esta movilidad de las partículas, resultado de la falta de cohesión, se denomina *fluidez*. Como dicha propiedad es común á los líquidos y á los gases, se les ha dado el nombre general de *fluidos*[1].

Observaciones. — 1°. La diferencia de estados físicos es un efecto de la temperatura de los cuerpos. Una misma sustancia, tal como el agua, puede existir sucesivamente en esos tres estados. La mayor parte de los cuerpos han sido reducidos á ellos, con mayor ó menor dificultad. Puede afirmarse que algún día se prepararán y conservarán todos los cuerpos en forma sólida, líquida ó gaseosa, según se quiera.

2°. Los tres estados físicos que acabamos de definir son, conforme á lo dicho, tipos distintos; pero relacionados entre sí por una serie de eslabones intermedios. Así, los líquidos viscosos, como las *conservas* y *jaleas*, pasan gradualmente del estado líquido al sólido. Más adelante veremos que los gases no se diferencian esencialmente de los líquidos cuando alcanzan cierto grado de compresión.

7. **Clasificación de las propiedades de la materia.** — La mayor

1. Del latín *fluere*, correr el líquido, manar.

parte de las propiedades que nos revelan, por mediación de los fenómenos, la existencia de la materia, son *accidentales* ó *particulares*. Las que definen los estados físicos, la tenacidad, la fluidez, la expansibilidad, son ejemplo de ellas; lo mismo decimos de las que caracterizan tal ó cual sustancia, como la transparencia, la coloración, etc. Estas *propiedades particulares* no pueden en consecuencia servir de modo alguno para caracterizar la esencia misma de la materia.

Otras propiedades se llaman *generales*, porque son comunes á todos los cuerpos. Tales son la *compresibilidad*, la *divisibilidad* y la *porosidad*. Pero no se consideran como *propiedades esenciales* de la materia más que la *extensión* y la *impenetrabilidad*, que se pueden hacer depender á su vez de otra propiedad esencial y única primordial, la *inercia*.

8. **Inercia.** — No es posible concebir la existencia de la materia independientemente del espacio que la contiene. Al mismo tiempo que percibimos un cuerpo, percibimos también los cuerpos que lo rodean, así como las relaciones de distancia que existen entre ellos. Según son variables ó constantes estas relaciones, el cuerpo nos parece hallarse en *movimiento* ó en *reposo*. Estos dos términos son tan claros por sí mismos, que si tratáramos de definirlos, no haríamos más que oscurecer su sentido.

Ahora bien, mientras los seres animados se mueven ó se detienen por efecto de una voluntad interior, se observa que *todos los cuerpos materiales* están desprovistos de espontaneidad, sea para andar, sea para pararse, hecho general que se expresa diciendo que esos cuerpos son *inertes*. La inercia es, pues, la *resistencia* que oponen todos los cuerpos sea al *movimiento*, sea al *cambio de movimiento*.

Esta resistencia es mayor ó menor según la *cantidad de materia* que el cuerpo contiene en un volumen determinado. La inercia es, pues, una propiedad susceptible de medida. Más adelante la estimaremos y definiremos su medida con el nombre de *masa*.

9. **Extensión.** — **Impenetrabilidad.** — Llámase *extensión* á la propiedad que tienen todos los cuerpos de ocupar una porción del espacio, *limitada* y *figurada*, es decir, dotada de volumen y de forma determinados.

La *impenetrabilidad* de los cuerpos consiste en que dos porciones distintas de materia no pueden identificarse nunca una con otra, de modo que *coexistan* en el mismo lugar del espacio.

10. **Compresibilidad.** — Esta es una propiedad general de la materia, que se define, conforme á la etimología del nombre, diciendo que es la propiedad que tienen todos los cuerpos *de poder reducirse á un volumen menor por efecto de la presión*.

La compresibilidad varía mucho de un cuerpo á otro y sobre todo de un estado físico á otro. Es muy grande en todos los gases, mucho menor y en grados diversos para los sólidos, y casi nula en los líquidos, que durante mucho tiempo se llamaron *fluidos incompre-*

sibles. Ya veremos más adelante que por la experiencia se ha podido probar y medir con precisión la compresibilidad de los líquidos.

Observaciones. — 1°. *Elasticidad*. — Con la compresibilidad se relaciona la *elasticidad*, propiedad que poseen la mayor parte de los cuerpos comprimidos de recobrar su forma y volumen primitivos así que la causa de compresión ha cesado de actuar.

2°. *Dilatabilidad*. — El volumen exterior de los cuerpos es una magnitud que varía no sólo con la presión exterior, sino también con la temperatura. Cuando la compresibilidad resulta de la variación de temperatura, y no de la depresión, se le da el nombre de *dilatabilidad*.

11. **Divisibilidad**. — Llámase de este modo la propiedad que poseen todos los cuerpos de poder ser convertidos en partículas *indefinidamente* pequeñas, sin perder por esto ninguna de las propiedades características de su sustancia.

Esta división puede efectuarse en los sólidos por gran número de procedimientos que nos suministran las artes mecánicas y las ciencias físicas. Así, sóplanse objetos de vidrio de 1 *micrón* [1] de grueso; estíranse alambres de platino de 0μ,8 de diámetro; bátense láminas de oro de 0μ,1 de grueso; y se cubre con alambres de plata una capa de oro que no pasa de 0μ,004.

Los líquidos volátiles y ciertas sustancias colorantes ú olorosas nos proporcionan ejemplos no menos admirables de divisibilidad. Se ha calculado que el diámetro medio de los *glóbulos de agua* que constituyen las nubes dispuestas á declararse en lluvia, varía entre 23 μ y 56 μ: de modo que el número de esos glóbulos contenidos en una gota de agua de 1 milímetro de diámetro varía entre 5 000 y 50 000. Un cienmilésimo de centímetro cúbico de *rosanilina* basta para dar color aparente á 1 litro de alcohol. Cinco centígramos de *almizcle* bastan para difundir olor sensible durante *varios* años en una habitación cuya atmósfera se renueve con frecuencia.

Sin embargo, estos ejemplos de división son poca cosa al lado de los que la naturaleza nos suministra por miles en el mundo microscópico de las celdas organizadas y de los infusorios. La gota de sangre humana que puede suspenderse de la punta de una aguja contiene más de un *millón* de glóbulos rojos esféricos. Si se mira con el microscopio una gotecilla de agua corrompida, ó de caldo fermentado, ó de vinagre vuelto, se ven multitud de animálculos que se mueven allí en todos sentidos con extremada vivacidad.

12. **Átomos y moléculas**. — Estos diversos ejemplos prueban que la divisibilidad de la materia es *indefinida*, toda vez que se la puede llevar hasta el grado en que las partículas escapan á la percepción de nuestros sentidos; ¿pero cabe considerarla como *infinita*, es decir, se puede hacerle traspasar todo límite?

1. Desígnase generalmente por el nombre de *micrón* al millonésimo de metro, ó a milésimo de milímetro; represéntasele por la letra griega μ.

Si se quiere hacer alusión á una divisibilidad *abstracta* y *geométrica*, no cabe dudar que es ilimitada. En efecto, por pequeña que se considere una partícula de materia, siempre se podrá *suponerla* dividida en dos mitades, y después cada una de éstas en otras dos, y así sucesivamente hasta lo infinito. Pero si se trata de una divisibilidad *real* y *física*, no podemos pronunciar nada absoluto, toda vez que ninguno de los métodos actualmente conocidos nos permite llevar la experiencia más allá de cierto grado de división, limitado por la agudeza mayor ó menor de nuestros sentidos y la precisión de los instrumentos de medida.

En la ciencia actual se admite que la división de la materia *no es infinita*. Suponiendo que se emplearan procedimientos de división mucho más perfectos que los de que hoy disponemos, se debería llegar á un límite infranqueable, el *átomo*, que se puede concebir como un volumen de figura determinada que la acción de las fuerzas naturales no puede dividir ó alterar.

Llámase *molécula* un grupo de átomos que representa la partícula más pequeña de una sustancia químicamente definida que puede existir en el estado individual y aislado.

Únicamente las moléculas son cosa semejante á los cuerpos, cuyas propiedades comparten y de los cuales sólo se diferencian en las dimensiones. Mediante las relaciones de posición que tienen entre sí, las moléculas determinan lo que llamamos el *volumen* y la *forma* de los cuerpos, mientras que las relaciones de posición de los átomos que forman las moléculas, distinguen á esos mismos cuerpos en lo relativo á la *sustancia*, es decir, desde el punto de vista de las *propiedades químicas*.

Por lo demás, ni la molécula ni el átomo son perceptibles por la acción de nuestros sentidos ó de nuestros instrumentos de medida.

13. **Poros moleculares. — Porosidad y permeabilidad.** — Debe admitirse que los cuerpos más duros, más tenaces y más compactos no están formados de materia absolutamente continua, pues si existiera esta continuidad, sería imposible explicar gran número de hechos que parecen en contradicción con la impenetrabilidad de la materia. ¿Cómo podría un mismo cuerpo contraerse ó dilatarse por el cambio de presión ó de temperatura? ¿Cómo podrían disolverse las sales en el agua, é insinuarse el mercurio en la masa de ciertos metales? ¿Cómo podrían efectuarse esas disoluciones y esas mezclas sin aumento aparente del volumen total, y aun en ocasiones con contracción aparente (54 volúmenes de alcohol y 50 de agua no producen sino 100 volúmenes de mezcla)? Precisa, pues, admitir que las moléculas no se encuentran *yuxtapuestas* en los cuerpos, sino que están separadas unas de otras por intervalos apreciables, susceptibles de aumento ó disminución bajo la influencia de causas exteriores.

Estos intervalos se llaman *poros moleculares*. Son del mismo orden de pequeñez que las moléculas.

De manera que los poros moleculares, como las moléculas, escapan enteramente á la apreciación de nuestros sentidos.

Observación. — No deben confundirse los poros moleculares ó accidentales que presenten ciertos cuerpos, vulgarmente llamados *porosos*, tales como las esponjas, la piedra pómez, etc. Estos intersticios físicos son visibles con frecuencia á la simple vista ó con el microscopio. La existencia de estas lagunas contituye la *permeabilidad* de los cuerpos, mientras que la de los poros propiamente dichos es la *porosidad.*

CAPÍTULO III

NOCIONES DE MECÁNICA.

DEFINICIONES FUNDAMENTALES Y PRINCIPIOS GENERALES.

14. **Objeto de la Mecánica.** — La *Mecánica* tiene por objeto el estudio del movimiento en sí y en sus orígenes, así como en sus consecuencias y aplicaciones.

De modo que los principios de este conocimiento hay que buscarlos en la naturaleza y no en la imaginación ; su descubrimiento se debe á la observación ayudada por la inducción, y no al simple razonamiento. Pero una vez sentados estos principios y leyes, toda la ciencia se deduce de ellos mediante la rigurosa aplicación del método geométrico. Hay pues motivo para considerar á la mecánica como una rama de las ciencias matemáticas : llámasela *Mecánica racional* para distinguirla de la *Mecánica celeste* y de la *Mecánica aplicada ó industrial*, que son adaptaciones de la ciencia abstracta, sea al movimiento de los astros, sea al funcionamiento de las máquinas. De esta última aplicación se deriva el nombre de la ciencia entera[1].

Nos contentaremos con exponer aquí las definiciones fundamentales y recordar los principios necesarios para la inteligencia é interpretación de los fenómenos físicos propiamente dichos. En lo relativo á desarrollo de esas doctrinas, conviene que el lector consulte los tratados especiales.

15. **Divisiones de la Mecánica racional.** — La Mecánica racional se subdivide ordinariamente en tres partes : la *Cinemática*, la *Estática* y la *Dinámica.*

En la *Cinemática*[2] se estudia primero el movimiento *en sí*, desde un punto de vista puramente abstracto y geométrico, sin preocu-

1. Del griego μηχανή, máquina.
2. De la palabra κίνημα, movimiento.

parse de las fuerzas que la producen. De manera que esta rama de la mecánica es una especie de geometría del movimiento, que junta con la *idea de espacio*, base única de la geometría, la *idea de tiempo*, correlativa de la noción de movimiento. Las demás partes de la Mecánica racional comprenden el estudio de las fuerzas ó causas del movimiento, que se considera sucesivamente en estado de equilibrio (*Estática*, de στατική, equilibrio), y después en el estado de acción *Dinámica*, de δύναμις, potencia).

CINEMÁTICA.

16. — **Definiciones preliminares.** — *Velocidad.* — La noción del movimiento, que implica las de espacio y de tiempo, se adquiere por la contemplación de un objeto cualquiera que cambia de lugar, por ejemplo, de un cuerpo grave que cae, de un proyectil que cruza la atmósfera, de un tren de camino de hierro que pasa. Al mismo tiempo se comprende lo que es *velocidad*, noción que abarca la de una rapidez *más ó menos grande*, de una *constante* y de una *variable*. Se observan estos diversos casos de velocidad en los aspectos sucesivos que toma un tren al partir de una estación, ó bien á la llegada, ó bien á cierta distancia, en el intervalo de dos estaciones.

Móvil. — Se llama móvil á todo cuerpo que está en movimiento.

Punto material. — Sólo una propiedad interviene en el estudio de su movimiento : la inercia. Es fácil suprimir con el pensamiento todas las demás, inclusa la extensión. De modo que no se consideran más que móviles sin extensión, esto es, reducidos á las dimensiones de un punto geométrico, sin más propiedad que la de ser *inertes*, esto es, de resistir al movimiento, en diversos grados, y caracterizados por sus masas ; he ahí lo que se denomina *puntos materiales*. Los resultados que se obtienen para un punto material único podrán aplicarse á un móvil de dimensiones finitas, pues todo cuerpo puede ser considerado como un sistema de puntos materiales.

Trayectoria. — El lugar geométrico de los puntos que el móvil ocupa sucesivamente en el espacio se llama su *trayectoria*.

Siendo el móvil un punto geométrico, su trayectoria es una línea geométrica. Según esta línea es recta ó curva, así se dice que el movimiento es *rectilíneo ó curvilíneo*.

17. **Movimiento uniforme.** — 1°. *Definición.* — Llámase *movimiento uniforme* á aquel en que un móvil recorre espacios iguales en tiempos iguales, por pequeños que sean estos tiempos. La voz *espacio* toma aquí el sentido restringido de *camino recorrido en la trayectoria*, ó de *porción de trayectoria*.

Según que la trayectoria es rectilínea ó curvilínea (fig. 1), así es á su vez el movimiento uniforme *rectilíneo ó curvilíneo*.

Este movimiento es el más sencillo que se puede imaginar, pero es el más difícil de realizar en la práctica y el más raro en la naturaleza.

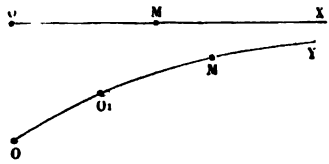


Fig. 1.

2°. *Velocidad.* — Se mide la *velocidad* por el espacio recorrido durante la unidad de tiempo. Si se toma como es costumbre el metro por unidad de longitud y el segundo por unidad de tiempo, se expresará la velocidad en *metros por segundo.* Diráse, por ejemplo, que la tierra gira sobre sí misma movimiento diurno) con una velocidad *de 463 metros por segundo* (para un punto del ecuador); ó bien se expresará que *la velocidad del movimiento curvilíneo uniforme* de un punto del ecuador terrestre *es de 463 metros por segundo.*

También se puede decir que, en el movimiento uniforme, *la velocidad es la relación del espacio recorrido al tiempo empleado en recorrerlo,* ó bien, *la relación del aumento del espacio con el aumento de tiempo.* Se la representa por la fórmula $v = \frac{e}{t}$, siendo e el espacio recorrido y t el tiempo.

18. **Movimiento variado.** — 1°. *Definición.* — El *movimiento variado* es aquel en que un móvil recorre en tiempos iguales espacios desiguales. El movimiento variado puede ser *rectilíneo* ó *curvilíneo.*

Un movimiento de esta clase puede ser variado de infinidad de maneras. Está definido en cada caso por la trayectoria del móvil y por la *ecuación de los espacios,* esto es, por la relación numérica que existe entre el *espacio* recorrido por el móvil en su trayectoria y el *tiempo* empleado en recorrerlo.

2°. *Velocidad media durante un intervalo de tiempo dado* (*Movimiento rectilíneo*). — Sea OX la trayectoria del móvil (fig. 2), M su posición en el tiempo t y M' en el $t + \Delta t$. (Designaremos, según costumbre algebraica, por Δe el aumento MM' del espacio y por Δt el del tiempo). Es evidente que se podría llevar al móvil desde la primera posición á la segunda, en el mismo tiempo Δt, imprimiéndole un movimiento rectilíneo *uniforme.* La velocidad de este movimiento virtual estaría dada por la ecuación

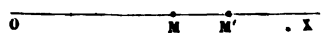


Fig. 2.

$$V_m = \frac{\Delta e}{\Delta t},$$

y se expresaría en metros por segundo. Este cociente $\frac{\Delta e}{\Delta t}$ es lo que se llama *velocidad media* del movimiento variado *durante el intervalo de tiempo* Δt *que sucede al instante* t.

Observemos que esta velocidad V_m depende al mismo tiempo del intervalo de tiempo Δt y de la época t á partir de la cual se le cuenta.

3°. *Velocidad en un instante* t *cualquiera* (*Movimiento rectilíneo*). — Si se supone que el intervalo de tiempo Δt disminuye indefinidamente y tiende hacia cero, el aumento de espacio MM' (fig. 2) tiende simultáneamente á cero; pero el cociente $\frac{\Delta e}{\Delta t}$, esto es, la velocidad media, tiende generalmente hacia un límite determinado; el valor de este límite es lo que se llama *velocidad* del movimiento variado *en el momento* t. Se tiene pues,

$$V_t = \text{lím.} \left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right).$$

Esta velocidad se expresa también en *metros por segundo*, como en el movimiento uniforme; pero se sobrentiende que no designa el trayecto efectuado realmente por el móvil en 1 segundo, sino *el que recorrería* si continuase andando, á partir del momento *t*, *con una velocidad que permaneciera constante* é igual á V_t.

19. **Movimiento rectilineo uniformemente variado.** — 1°. *Definición.* — El más sencillo de los movimientos variados, y al mismo tiempo el más interesante en la práctica, es el *movimiento rectilíneo uniformemente variado.* Dícese que un movimiento rectilíneo es uniformemente variado, cuando la velocidad *aumenta* ó *disminuye* cantidades iguales en tiempos iguales, por pequeños que éstos sean.

En el primer caso, el movimiento es *uniformemente acelerado :* tal es el de un cuerpo que cae, haciendo abstracción de la resistencia del aire. En el segundo es *uniformemente retardado :* tal es el de una piedra lanzada verticalmente de abajo arriba.

La cantidad, positiva ó negativa, que la velocidad varía en la unidad de tiempo, se llama *aceleración.*

2°. *Velocidad.* — Débese definirla de la misma manera que en un movimiento variado cualquiera : es el límite de $\left(\frac{\Delta e}{\Delta t}\right)$ cuando Δt tiende hacia cero.

3°. *Leyes del movimiento uniformemente acelerado.* — Las ecuaciones del movimiento se enuncian con el nombre de *leyes del movimiento uniformemente acelerado.*

I. LEY DE LAS VELOCIDADES. — *Las velocidades crecen proporcionalmente á los tiempos.* Es decir que, después de un tiempo doble, triple, cuádruple, la velocidad es 2, 3, 4 veces mayor.

II. LEY DE LOS ESPACIOS. — Los *espacios recorridos son proporcionales á los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.* Es decir que si se representa por 1 el camino recorrido en un segundo, los caminos recorridos en 2, 3, 4, 5... segundos estarán representados por 4, 9, 16, 25...

4°. Al estudiar el descenso de los cuerpos veremos un ejemplo de movimiento uniformemente acelerado caracterizado por estas leyes.

20. **Movimiento absoluto, movimiento relativo, movimiento aparente.** — Hasta ahora hemos supuesto que el móvil cambiaba de posición respecto de un punto fijo, el *origen de los espacios*, en una trayectoria, recta ó curva, cuyos puntos todos eran igualmente fijos. Para esto nos colocamos en el caso del *movimiento absoluto*, caso ideal, imposible de descubrir en la naturaleza é irrealizable en la práctica. Esta hipótesis no altera en nada sin embargo los resultados que hemos obtenido, pues mientras sólo se consideran los cambios de posición de un punto material respecto de otros puntos de referencia dados, importa poco que estos puntos de referencia estén realmente fijos en el espacio : basta que lo sean respecto del móvil considerado.

El caso ordinario es aquel en que los puntos de referencia así como los de la trayectoria del móvil son llevados todos por un movimiento común cualquiera, que se llama *movimiento de arrastre*. El movimiento que el móvil posee entonces en su propio sistema es un *movimiento relativo*. Tal es, por ejemplo, el de las bolas de un billar instalado en un buque en marcha. Tal es el movimiento de un barco respecto de las orillas de un río; pues éstas participan con él del doble movimiento de la Tierra, que gira sobre sí misma al mismo tiempo que se mueve en torno del Sol. Tales son, por fin, todos los movimientos que observamos, sea en torno nuestro, sobre la faz de la Tierra, sea sobre nuestras cabezas, en los espacios celestes.

Resumiendo, cuando un móvil M se mueve en un sistema A fijo ó que se supone tal, este móvil tiene *movimiento absoluto;* pero cuando el sistema A cambia á su vez de lugar respecto de otro sistema B, supuesto fijo, el móvil M tiene movimiento *relativo* en el sistema A y *absoluto* en el sistema B.

Á menudo se confunden las expresiones *movimiento relativo* y *movimiento aparente*, que sin embargo no son idénticas. El movimiento *aparente* del móvil M puede ser, según la situación del observador que considera el movimiento, ya su movimiento relativo en el sistema A, ya su movimiento absoluto en el sistema B. Si el observador forma parte del sistema A, el movimiento que percibe, que es *aparente para él*, es el movimiento relativo de M en A; si el observador pertenece al sistema B, el único movimiento que sea *aparente para él*, es el movimiento absoluto de M en B.

21. **Composición de los movimientos.** — La consideración del movimiento relativo y del absoluto, conduce al problema general siguiente :

Un movil M *está animado de un movimiento relativo en el sistema* A ; *este sistema* A *está animado á su vez de un movimiento de arrastre en el sistema* B : *conociendo estos dos movimientos, hallar el movimiento absoluto del móvil* M *en el sistema* B.

Esto es lo que se llama *problema de la composición de los movi-*

mientos, porque el movimiento de M en B puede considerarse como un movimiento *compuesto* ó *resultante* de los otros dos, que son por su parte los *movimientos componentes*.

Tiene este problema por complemento otro inverso, el de la *descomposición* de los movimientos. Puede enunciarse como sigue de manera abreviada :

Dado el movimiento resultante y uno de los componentes, hallar el otro movimiento componente.

La Cinemática tiene por objeto la resolución de estos dos problemas, sea en el caso general de que el movimiento de arrastre del sistema A es un movimiento cualquiera, sea en el caso más ordinario de que este movimiento de arrastre es un movimiento de *traslación*[1].

ESTÁTICA.

22. **Fuerzas. — Equilibrio. — Estática.** — Se llama *fuerza* á toda causa capaz de producir el movimiento ó de modificarlo. La acción de los músculos en los animales, la gravedad, las atracciones y las repulsiones magnéticas ó eléctricas son fuerzas. Ignoramos en qué consisten éstas, pero la noción de ellas nos está dada claramente por la sensación del esfuerzo. Esta noción de fuerza implica tres elementos que la caracterizan, á saber, el *punto de aplicación* de la fuerza, su *dirección* y su *intensidad*.

Hallándose aplicadas varias fuerzas á un mismo cuerpo, puede suceder que se neutralicen mutuamente y que el estado de reposo ó de movimiento del cuerpo no se modifique. Entonces se dice que *el cuerpo está en equilibrio* y que las fuerzas aplicadas al cuerpo *se equilibran*.

Llámase *Estática* á la parte de la mecánica que trata de las fuerzas consideradas en estado de equilibrio y que determina las condiciones de este equilibrio.

23. **Medida de las fuerzas. — Dinamómetros.** — Dícese que dos fuerzas son *iguales* cuando, aplicadas en sentido contrario á un

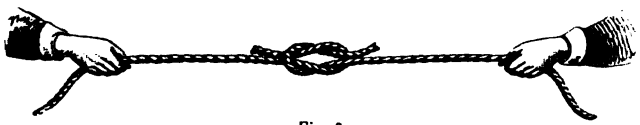


Fig. 3.

mismo punto material (fig. 3), se equilibran entre sí. Y se dice que una fuerza es *doble, triple* de otra, cuando equilibra á dos, á tres

1. Dícese que un sistema A está animado de un movimiento de *traslación*, cuando todos sus puntos describen, en el mismo tiempo, rectas iguales y paralelas. Un movimiento de traslación puede ser uniforme ó variado.

fuerzas iguales á ésta, y aplicadas simultáneamente en sentidos contrarios sobre el mismo punto material.

El estado de equilibrio proporciona el medio de *comparar* la intensidad de una fuerza, con la intensidad de otra considerada como unidad, esto es, de *medir* las fuerzas. La unidad ordinariamente adoptada, conforme al sistema métrico, es el *kilogramo. Teóricamente*, este es la fuerza con que una masa de agua pura, á la temperatura de 4°, de un litro de volumen, es solicitado por la gravedad. *Prácticamente*, es la fuerza con que la gravedad solicita una masa de platino, fabricada de modo que realiza el kilogramo teórico, y conservada en los Archivos de París con el nombre de *kilogramo-tipo.*

La comparación de las fuerzas con la unidad se efectúa por medio de instrumentos especiales llamados *dinamómetros.* Esencialmente se componen todos de un resorte, cuya elasticidad puede equilibrar fuerzas variables. Aplicando sucesivamente al resorte pesos conocidos, y marcando las flexiones correspondientes, se graduará el instrumento en kilogramos. Una fuerza desconocida cualquiera, aplicada después al resorte y que produzca la misma flexión que un peso de *n* kilogramos, valdrá á su vez, por definición, *n* kilogramos.

Observación. — Si la fuerza conserva siempre la misma intensidad de *n* kilogramos, se dice que es una *fuerza constante ;* si su intensidad aumenta ó disminuye con el tiempo, se dice que es una *fuerza variable en magnitud;* si cambia de dirección al mismo tiempo que de intensidad, se dice que es *variable en magnitud y en dirección.*

24. **Dinamómetros usuales.** — 1°. *Pesón.* — Uno de los dinamómetros usuales más sencillos es el *pesón*, que se funda en la fuerza de elasticidad desarrollada por la presión en un muelle de acero.

Descripción. — Consiste en una lámina de acero templada AB (fig. 4), encorvada

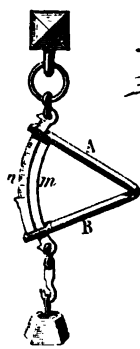


Fig. 4.

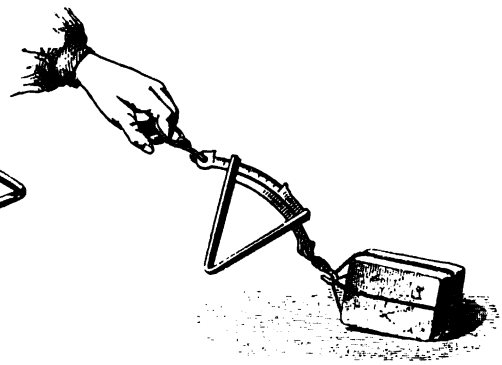


Fig. 5.

á manera de V. En la extremidad de la rama B se fija un arco de hierro *n*, que se prolonga y pasa libremente por una abertura practicada en la extremidad de la rama A. En ésta se encuentra fijo un arco parecido *m*, que penetra á su vez

análogamente en el brazo B. Los arcos *m* y *n* terminan, aquél en un garfio, el segundo en un anillo, y en el arco *n* hay una escala graduada que se obtiene de la manera siguiente.

Graduación. — Habiendo fijado el aparato en un perno resistente, se suspenden uno después de otro en el garfio pesos de 1, 2, 3, 4, 5.... kilogramos. El brazo B, mantenido por el arco *n*, permanece fijo mientras que A, arrastrado por la carga que sostiene el arco *m*, baja cada vez más. Así se continúa hasta el límite de flexión que puede alcanzar la lámina AB sin romperse, teniendo cuidado á cada nueva carga de hacer una marca en el arco *n*, en el punto donde se para el brazo A; por fin se inscriben de 5 en 5 los números 0, 5, 10, 15 20..., y el instrumento queda graduado.

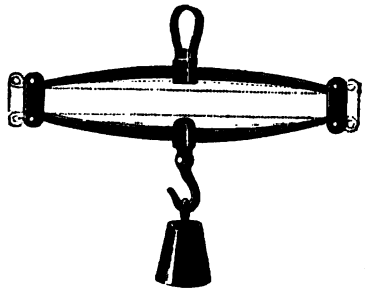


Fig. 6.

Usos. — Para aplicar el pesón á la medida de las fuerzas, para apreciar, pongamos por ejemplo, el esfuerzo necesario de arrastre de un fardo (fig. 5) se fija el garfio del arco *m* á ese bulto y después, tomando con la mano el anillo del arco *n*, se tira hasta que el movimiento se produzca. La flexión del brazo A marca entonces en kilogramos sobre el arco *n* el valor del esfuerzo de tracción.

2°. *Dinamómetro de Poncelet.* — Otro dinamómetro frecuentemente usado es el de Poncelet (fig. 6). Está formado por dos muelles metálicos engarzados en sus extremidades por dos láminas fuertes y rígidas. En el reposo, los dos brazos del instrumento son rectilíneos y paralelos (líneas de puntos, fig. 6). Si se aplica por una parte una fuerza y por otra pesos conocidos en los garfios de que los resortes están provistos, los dos brazos se encorvan en sentido contrario hasta que resulta equilibrio entre el esfuerzo y la resistencia.

25. **Representación de las fuerzas.** — Una fuerza está completamente determinada cuando se conoce su punto de aplicación, su dirección y su intensidad. Estos diversos elementos pueden representarse como se han figurado en cinemática las velocidades y las aceleraciones. Trázase por su punto de aplicación, en el sentido de su dirección, una línea recta indefinida; después se lleva una unidad arbitraria de longitud (por ejemplo el centímetro) á esta línea, partiendo del punto de aplicación y en el sentido de acción de la fuerza, tantas veces como la fuerza dada contiene á la unidad que sirve para medirla. Distínguense las fuerzas unas de otras marcándolas con las letras P, Q, R..., que se colocan en sus direcciones respectivas á la extremidad de la longitud que representa su intensidad (fig. 7).

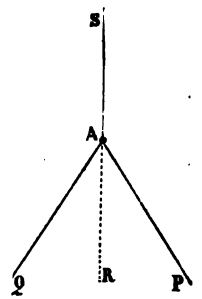


Fig. 7.

Observación. — Este método de representación gráfica permite aplicar al estudio de las fuerzas los mismos métodos geométricos que al de los movimientos. De modo que la estática es, como la cinemática, una especie de geometría, que une á la idea de espacio, no

sólo la de tiempo, sino también la nueva idea de fuerza. Dadas estas nociones fundamentales y los principios de observación que envuelven, la estática procede geométricamente, como la cinemática, y llega de deducción en deducción á plantear las condiciones de equilibrio de un sistema de fuerzas cualesquiera aplicadas á un sistema de puntos materiales.

26. **Resultante y componentes.** — Cuando varias fuerzas P, Q, R..., aplicadas á un mismo punto material A (fig. 7), se equilibran entre sí, *es evidente que* una cualquiera de ellas, R por ejemplo puede anular la acción de todas las demás. Una fuerza S, igual y opuesta á R, produciría pues por sí el mismo efecto que el sistema de las fuerzas P y Q. Toda fuerza que puede producir de este modo el mismo efecto que varias simultáneas, se llama su *resultante*, y las primeras son las *componentes* de ésta. La fuerza S es la resultante de las fuerzas P y Q y éstas son sus componentes.

El problema de la *composición de las fuerzas* consiste en hallar la resultante de un sistema cualquiera de ellas. El problema inverso de la *descomposición de las fuerzas* tiene por objeto descubrir el sistema de fuerzas que produce efecto análogo al de una fuerza única dada. Estas fuerzas se suponen aplicadas siempre, sea á un punto material único, sea á un sistema de puntos materiales separados por intervalos invariables, y que constituye *cuerpos sólidos* absolutamente *rígidos*, es decir, incompresibles é indeformables.

El primer problema que se presenta en estática es el de la *composición* y de la *descomposición* de las fuerzas. Es indispensable conocer su solución para resolver todas las cuestiones de equilibrio.

DINÁMICA.

27. **Definiciones.** — La *Dinámica* (de δύναμις,, potencia, fuerza) es la parte de la mecánica en que se estudian las fuerzas, no ya en *estado estático*, es decir, equilibrándose en un sistema material, sino en el *estado dinámico*, esto es, produciendo el movimiento.

El objeto de la Dinámica es resolver el doble problema siguiente :

1°. Dadas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, determinar el movimiento de este cuerpo.

2°. Dado el movimiento de un cuerpo, determinar las fuerzas que actúan actualmente sobre este cuerpo.

La dinámica se funda en tres principios generales, especie de *postulados* que se han obtenido por inducción observando ciertos fenómenos naturales y que se comprueban por la experiencia en sus consecuencias prácticas. Tales son :

1°. El *principio de la inercia*, cuya idea se debe á Képler;

2°. El *principio del movimiento relativo*, enunciado por Galileo;

3°. El *principio de la igualdad de la acción y de la reacción*, descubierto por Newton.

28. **Principio de la inercia.** — 1°. *Un cuerpo no puede modificar por sí mismo su estado de reposo ni su estado de movimiento.*

2°. *Si un cuerpo libre no se halla solicitado por ninguna fuerza, este cuerpo se encuentra en reposo ó bien está animado de un movimiento rectilíneo y uniforme.*

La primera proposición es la única manera general de enunciar el principio de la inercia. Sin embargo, hablando en propiedad no constituye un principio, pues se reduce á expresar con forma nueva la existencia de esta propiedad esencial de la materia que hemos definido por el nombre de *inercia*. Por el contrario, la segunda parte es un verdadero postulado. Nada podía hacer adivinar *a priori* que el *movimiento natural* de los cuerpos es el rectilíneo y uniforme ; hasta se creyó mucho tiempo que era el circular y uniforme. Pero el simple hecho de una bola lanzada sobre un piso horizontal perfectamente llano, que se mueve de modo visible en línea recta con velocidad, no constante, sino decreciente poco á poco (por causa del frotamiento), ha bastado para indicar este principio ; después se le ha generalizado por inducción, y al fin comprobado experimentalmente en sus consecuencias.

29. **Principio del movimiento relativo.** — *En un sistema de puntos materiales animados por un movimiento de traslación, toda fuerza que actúa sobre uno de ellos le imprime el mismo cambio de posición respecto de los demás que si el sistema estuviera en reposo.*

La observación no indica claramente este principio sino en el caso de ser rectilíneo y uniforme el movimiento de traslación, como el de un barco que baja tranquilamente por un río ; pero las consecuencias que de ahí se deducen llevan á admitirlo también en el caso general de un sistema animado por un movimiento de traslación cualquiera.

Consecuencia : definición experimental de la velocidad en el instante t *en un movimiento variado.* — De los dos principios anteriores resulta el corolario siguiente : *Si un cuerpo libre está solicitado por una fuerza cualquiera, toma un movimiento variado ; y si se suprime esta fuerza en un momento* t, *el cuerpo continúa moviéndose con movimiento rectilíneo y uniforme : la velocidad de este último movimiento es precisamente la velocidad del movimiento variado en el instante* t, *y su dirección la de la tangente á la trayectoria en el punto donde el cuerpo se hallaba en el instante* t.

30. **Principio de la igualdad entre la acción y la reacción.** — *Cuando en un sistema de puntos materiales* (fig. 8), *un punto* A *ejerce sobre otro punto* B *una acción representada por una fuerza* F *dirigida según la recta que une los dos puntos, el punto* B *ejerce á su vez invera samente sobre el punto* A *una reacción, representada por una fuerze* (— F), *dirigida según la misma recta é igual á* F, *pero contraria.*

Los dos primeros principios permiten resolver los dos problemas de la dinámica para un punto material único; el tercer principio permite generalizar sus soluciones y extenderlas al caso de un sistema material.

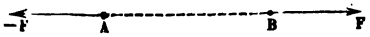


Fig. 8.

31. **Masa.** — 1°. *Noción física de la masa.* — Se demuestra en los tratados de mecánica que si se aplica una misma fuerza á cuerpos diferentes, les imprime en general movimientos uniformemente acelerados, con aceleraciones diferentes. De aquí resulta que los diferentes cuerpos no oponen la *misma resistencia* al movimiento; no son *inertes* en el mismo grado. Esto es lo que se expresa diciendo que dos cuerpos tomados al acaso *no tienen la misma masa.* Por el contrario, serían *de masa igual* si hallándose sometidos sucesivamente á la misma fuerza, adquirieran la misma aceleración.

La masa es una cualidad inherente á cada cuerpo, independiente de su estado de reposo ó de movimiento así como de su posición respecto de los demás cuerpos del universo. La masa resulta de la *cantidad de materia* que el cuerpo contiene.

2°. *Definición y fórmula.* — Demuéstrase por otra parte que varias fuerzas F, F', F''...., aplicadas sucesivamente á un mismo cuerpo, le imprimen aceleraciones diferentes γ, γ', γ''...., que son exactamente proporcionales á estas fuerzas (47). De aquí resulta que se pueden escribir, respecto de este cuerpo, la serie de cocientes iguales

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} = \ldots = \text{constante}$$

y que esta constante es característica del cuerpo, en el punto de vista de *su resistencia al movimiento* ó de *su grado de inercia.* Es, pues, natural tomar esta relación ó cociente para definir la expresada cualidad del cuerpo; á esto es á lo que se da el nombre de *masa*, que equivale al de *coeficiente de resistencia al movimiento.* Luego, llamando M á la masa de un cuerpo cualquiera, se tiene por definición

$$M = \frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \ldots.$$

3°. *Medida de la masa.* — Esta fórmula permite calcular fácilmente la masa de un cuerpo cualquiera. Con efecto, entre las fuerzas constantes que se pueden hacer actuar sobre un cuerpo, aquella de que con mayor facilidad disponemos es la gravedad. Su acción empieza espontáneamente desde que se retira á un cuerpo toda especie de sostén, haciendo que el objeto caiga al suelo con movimiento rectilíneo y acelerado, según se verá más adelante. La aceleración de este movimiento es la misma para todos los cuerpos en un mismo

lugar de la Tierra : represéntasela por g y recibe el nombre de *aceleración* ó *intensidad* de la gravedad. Cuanto á la resultante de las acciones de la gravedad sobre el cuerpo, es igual á la *presión* que el cuerpo ejercía sobre su sostén antes de la caída : he ahí lo que se llama el *peso* P del cuerpo; más lejos aprenderemos á calcularlo en cada caso. Se tendrá, pues, aplicando la fórmula general al caso particular de la gravedad,

$$M = \frac{P}{g}.$$

La masa de un cuerpo es pues igual al cociente de su *peso* por a *aceleración de la gravedad.* El número que expresa esta medida depende por lo demás de las unidades elegidas para el peso y la aceleración.

32. **Trabajo mecánico de una fuerza constante en magnitud y en dirección.** — 1°. *Caso en que el punto de aplicación se mueve en la dirección de la fuerza.* — Llámase *trabajo de la fuerza* (para llevar su punto de aplicación desde A á B) *al producto del espacio* AB$=e$ (valuado en unidades de longitud) *por la intensidad* F *de la fuerza* (estimada en unidades de fuerza). Designando por T el trabajo, se tiene T$=$Fe.

Fig. 9.

Si la fuerza actúa en el sentido del movimiento XY, se dice que es *andante* y se da al trabajo el signo $+$; si la fuerza actúa en sentido contrario del camino recorrido, se dice que es *resistente* y su trabajo es negativo : T$=-$(Fe) (fig. 9).

2°. *Caso de un cambio de lugar rectilíneo que no está en la dirección de la fuerza.* — Entonces el trabajo es *el producto de la fuerza por el camino recorrido y por el coseno del ángulo* α *de las dos rectas :* T$=$Fe cos α. El trabajo es positivo ó negativo, según que cos α es $+$ ó $-$, es decir, según α sea un ángulo agudo ú obtuso (fig. 10).

En el caso de ser α un ángulo agudo, la proyección de la fuerza sobre la dirección del movimiento está dirigida en el mismo sentido que éste : puede decirse que la proyección de la fuerza es *andante*; lo contrario ocurre en el caso de ser α obtuso : la proyección de la fuerza es *resistente.*

Observación. — También se puede considerar el producto e cos α como la proyección AB′ del camino recorrido (fig. 10) sobre la dirección de la fuerza y comprender este caso en el anterior.

3°. *El punto de aplicación de la fuerza recorre un camino curvilíneo.* — Entonces el trabajo es *el producto de la fuerza por la proyección del arco de trayectoria* MN *sobre la dirección constante* XY *de la fuerza :* T$=$F. M′ N′ (fig. 11).

De aquí resulta que el trabajo de una fuerza constante en dirección, no depende en manera alguna del camino realmente recorrido por

su punto de aplicación. En efecto, ya se realice el movimiento según el arco MAN ó según el arco MA_1N, ó según cualquiera otra

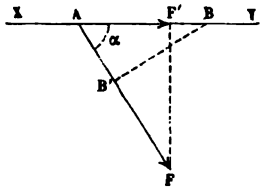


Fig. 10.

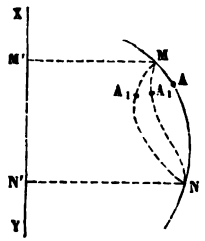


Fig. 11.

curva que tenga las mismas extremidades A y B (fig. 11), el producto $F \times M' N'$ es siempre el mismo.

33. **Fuerza viva, potencia viva.** — 1°. *Caso de un punto material.* — Se llama *fuerza viva* de un punto material, *en el momento* t, *al producto de la masa de este punto por el cuadrado de la velocidad que posee en este momento.*

Si m es la masa del punto, V su velocidad en el momento t, y si se designa por W la fuerza viva, tendremos por definición,

$$W = mV^2.$$

Ordinariamente lo que entra en las fórmulas de mecánica es la mitad de este producto; por esto se da algunas veces al producto $\frac{1}{2} m V^2$ un nombre particular, el de *potencia viva.*

2°. *Caso de un sistema.* — Llámase *fuerza viva* de un sistema de puntos materiales á *la suma de las fuerzas vivas de los diferentes puntos que lo componen.* De modo que esta cantidad es una suma de productos análogos á mV^2. Desígnasela por el símbolo Σ, y se escribe

$$W = \Sigma (mV^2).$$

34. **Teorema del trabajo ó de las fuerzas vivas.** — 1°. *Caso de un punto material.* — *El trabajo efectuado por una fuerza para llevar á un punto material de una posición á otra en su trayectoria, es igual á la variación de potencia viva que ha sufrido el punto material durante ese movimiento.*

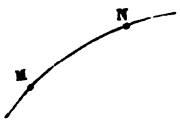


Fig. 12.

Sean m la masa del punto material, M su posición inicial y V_0 su velocidad inicial, N su posición final y V su velocidad final (fig. 12). La variación de potencia viva es igual á la semi-variación de fuerza viva $\frac{1}{2} mV^2 - \frac{1}{2} mV_0^2$. Si T

es el trabajo realizado por la fuerza, el teorema se expresa por la ecuación llamada de las *fuerzas vivas*,

$$T = \frac{1}{2} m (V^2 - V_0^2).$$

2°. *Caso de un sistema.* — En el caso de un sistema de puntos materiales sometidos á la acción de un sistema de fuerzas cualesquiera, el teorema se aplica también, con forma más general, que constituye el *principio de la conservación de la energía* (37).

35. **Transformación del trabajo en fuerza viva y de la fuerza viva en trabajo.** — Entre el trabajo mecánico y la fuerza viva no hay sólo una relación numérica, expresada por la ecuación de las fuerzas vivas, sino que entre estas dos cantidades existe relación natural de transformación recíproca. El trabajo mecánico se transforma gran número de veces en fuerza viva, ó al contrario.

Supongamos por ejemplo una bala de fundición, de peso P y de masa M, lanzada horizontalmente por un cañón contra un obstáculo material, sea un terraplén de barro ó de mampostería. El agente motor es aquí la expansión de una masa gaseosa elevada á alta temperatura : representemos por F su intensidad media mientras dura su acción. La fuerza F actúa sobre la bala durante el tiempo que ésta tarda en ir desde el fondo del tubo hasta la boca : si el camino recorrido se representa por L, el trabajo gastado por la fuerza será FL.

Sale la bala del cañón y empieza á recorrer su trayectoria exterior con una velocidad inicial V, determinada por la ecuación de las fuerzas vivas

$$\frac{1}{2} MV^2 = FL.$$

El trabajo FL se ha transformado pues en la potencia viva inicial $\frac{1}{2} MV^2$ de la bala : ahí está todo entero.

Despreciemos las acciones retardadoras, tales como la resistencia del aire atravesado y la atracción de la gravedad : la bala llega pues, con esta misma cantidad de fuerza viva, al contacto del obstáculo que debe destruir. El obstáculo le opone una resistencia que se podría calcular en unidades de fuerza : sea F' su valor; la bala vence esta resistencia y penetra en el terraplén hasta que se reduce á cero su velocidad. Detiénese, pues, á una profundidad L', que está determinada por la ecuación de las fuerzas vivas. En efecto, el trabajo resistente F' L', vencido por la bala, está relacionado con la fuerza viva de la bala por la ecuación

$$F' L' = \frac{1}{2} MV^2$$

La fuerza viva ha vuelto á transformarse en trabajo, trabajo que produce el daño, el efecto destructor causado por el proyectil. De consiguiente, la *potencia viva* $\left(\frac{1}{2} MV^2\right)$ mide la *potencia de destrucción* que la bala llevaba consigo al salir del cañón. Se ve que esta potencia de destrucción es proporcional al cuadrado de la velocidad y á la masa, ó el peso del proyectil. — Hace mucho tiempo que los artilleros han demostrado empíricamente esta ley[1].

36. **Energía actual. — Energía potencial.** — 1°. *Energía actual.* — Se ve, pues, que el producto FL por una parte, esto es el trabajo, y por otra el producto $\frac{1}{2} MV^2$, quiere decir la potencia viva, son dos expresiones equivalentes de una misma cualidad de los cuerpos en movimiento, á saber *la aptitud para vencer los obstáculos* que posee un cuerpo de masa M, animado de velocidad V. Esta aptitud es la que se llama propiamente *energía*. Puede ser expresada, ya por el producto FL, ya por el $\frac{1}{2} MV^2$, así como puede manifestarse alternativamente bajo la forma de *trabajo* ó bajo la de *fuerza viva*.

Mientras se manifiesta en una ú otra forma, se le da con frecuencia un nombre único, el de *energía actual*, que significa energía *en acto* ó *energía en movimiento*. También se dice, en el mismo sentido, *energía dinámica*.

2°. *Energía potencial.* — Cuando la energía no se manifiesta en ninguna de estas dos formas mecánicas, existe sin embargo *en estado latente*, ó sea *en potencia*, según se dice en filosofía.

Así, el sistema material constituído por la Tierra de una parte y de la otra por un cuerpo grave, sea una piedra, de peso P y de masa M, que estuviera inmóvil sobre un sostén á la altura h, no se encuentra de modo alguno, por lo que se refiere á la energía, en las mismas condiciones que el mismo sistema si la piedra se hallara inmóvil en el suelo. Efectivamente, suprimiendo el sostén, de modo que la piedra caiga, ésta adquirirá por el simple hecho de su descenso, una energía actual que irá aumentando, y que alcanzará el valor Ph en el momento de tocar el suelo la piedra. Por consiguiente en su posición inicial el cuerpo grave poseía en *estado latente* ó *en potencia*, no obstante hallarse inmóvil, la energía que después se manifestó en su descenso. Á esta especie de energía, energía tranquila al parecer almacenada en el cuerpo, es á lo que se llama *energía potencial* (ó *en potencia*), por oposición á la energía actual ó *energía de posición*.

Por ejemplo, una masa de agua de peso P, situada á una altura h, constituye una provisión de energía igual á Ph. Esta energía potencial es igual á la actual (trabajo ó fuerza viva) que ha sido necesario

1. Jouffret, *Introduction à la théorie de l'énergie.*

gastar para que el agua suba á la altura h y llenar con ella el depósito.

Análogamente, cuando se da cuerda á un reloj, gástase cierta cantidad de energía dinámica que se acumula en el muelle, bajo la forma de *energía de posición*, y que volverá á transformarse lentamente en energía dinámica, á medida que el muelle vaya poniendo las ruedas en movimiento.

3°. *Energía total.* — La cantidad de energía de posición que posee el muelle de reloj en un momento dado depende de la cantidad de energía dinámica que se ha acumulado allí al darle cuerda. Si sólo se dan tres ó cuatro vueltas á la llave, el muelle no habrá adquirido toda la energía potencial de que es susceptible, y no podrá originar al desarrollarse bastante energía dinámica para hacer que los minuteros efectúen una vuelta entera de la muestra ó cuadrante. Pero si se comunica al muelle su grado de tensión máximo, producirá al desarrollarse toda la energía que es capaz de guardar primero en forma potencial y de devolver luego en forma dinámica: esto es lo que se llama la *energía total* del muelle.

Se ve que esta es *la energía que el resorte puede, sea acumular, pasando desde el límite extremo de expansión al límite último de tensión, sea devolver, volviendo á pasar por el contrario desde el estado de tensión máxima al de expansión completa.*

Lo mismo ocurre en el caso de los cuerpos graves. Si en vez de elevar la masa de agua á una altura h, se la lleva á elevaciones sucesivamente mayores, la gravedad realizará en esta masa un trabajo cada vez mayor y le comunicará energía potencial cada vez más considerable. Para dar á la gravedad la plenitud de su acción, y almacenar en la masa su energía total, sería necesario suponerla en una altura tal que se hiciera insensible la atracción terrestre.

Este caso se realiza de manera aproximada con los asteroides que la Tierra encuentra en su revolución alrededor del sol, los cuales son arrastrados por ella á su esfera de acción, y que atraviesan su atmósfera con el nombre de *estrellas erráticas* ó *bólidos*. La *energía total* de uno de estos bólidos es la cantidad de fuerza viva que ha adquirido, desde el instante en que se apoderó de él la gravedad hasta el momento de tocar el suelo.

Generalmente, la energía total de un sistema material, es la *cantidad máxima de energía* que, bajo la influencia de las fuerzas á que está sometido puede el sistema acumular, bajo la forma de energía potencial, para restituirla después en forma de energía dinámica.

37. **Principio de la conservación de la energía.** — Cuando un cuerpo grave, de peso P y de masa M cae en el vacío desde una altura h, adquiere una fuerza viva $\frac{1}{2}$ MV² determinada por la ecuación

$$Ph = \frac{1}{2} mV^2 ;$$

pero al mismo tiempo que su energía dinámica aumenta en $\frac{1}{2} mV^2$, su energía potencial disminuye en la cantidad equivalente Ph. Inversamente, cuando un cuerpo grave se eleva según la vertical, su energía potential crece, á la vez que su energía dinámica disminuye en una cantidad equivalente. De modo que entre estas dos clases de energía se establece una compensación exacta, de manera que su suma, ó sea la energía total del cuerpo, permanece invariable. En este hecho consiste el principio de la conservación de la energía. No sólo se aplica al caso de la gravedad sino que es el principio más general de la mecánica, y se puede enunciarlo de la manera siguiente :

Dado un sistema de puntos materiales solicitado por fuerzas interiores y por fuerzas exteriores, la semi-variación de fuerza viva del sistema, relativa á un intervalo de tiempo determinado, es igual á la suma algébrica de los trabajos efectuados por las fuerzas, ya interiores, ya exteriores, durante el mismo intervalo de tiempo[1].

Tal es el principio de la conservación de la energía, base de la física moderna, como el de la conservación de la materia sirve de fundamento á nuestra química. Ya hemos dicho que el objeto de la física es la *materia en movimiento*. Ahora bien, el efecto inmediato de la materia en movimiento es la *energía* ; y la energía es la que produce por sus transformaciones, no sólo el trabajo y la fuerza viva, sino todas las propiedades de los cuerpos, todos los agentes físicos, el sonido, el calor, la luz y las fuerzas de toda clase. Podemos en consecuencia decir que el objeto de la física es *la energía y sus transformaciones*.

38. **Unidades métricas de energía y de potencia.** — Siendo el trabajo y la fuerza viva dos formas diferentes de una misma magnitud, la energía, es natural medirlas ó calcularlas valiéndose de la misma unidad.

1°. *Kilográmetro.* — El producto Ph, es decir, la expresión del trabajo de la gravedad es lo que ha servido para la elección de la unidad de energía. Se ha tomado el trabajo correspondiente á un peso de 1 kilogramo cuyo punto de aplicación recorriera 1 metro en su propia dirección, y se le ha llamado *kilográmetro*. Tal es la unidad vulgar de energía, esto es, la unidad correspondiente á las unidades del sistema métrico[2].

La definición del kilográmetro es completamente independiente

1. Este enunciado se expresa algébricamente por la ecuación

$$\sum \frac{m V_1^2}{2} - \sum \frac{m V_0^2}{2} = T_e + T_i,$$

designando por V_0 y V_1 la velocidad inicial y la velocidad final, por T el trabajo de las fuerzas exteriores y por T_i el de las fuerzas interiores.

2. En el *sistema de las unidades absolutas*, llamado *sistema* C, G, S. (78) se adopta otra unidad de energía, llamada el *erg*, que vale próximamente un cienmillonésimo de kilográmetro.

del tiempo, porque el trabajo sólo depende de la intensidad de la fuerza y del camino recorrido por su punto de aplicación.

2°. *Unidad de potencia : caballo de vapor.* — Pero en la industria, donde hay que tener cuenta del tiempo, artículo muy caro, se define otro coeficiente de energía que depende del tiempo : es la *potencia.* Llámase *potencia* de un motor á la cantidad de trabajo ó de energía que puede suministrar en 1 segundo. La unidad de potencia es el *caballo de vapor,* esto es *el trabajo de 75 kilográmetros efectuado en 1 segundo.*

Esta unidad fué elegida por Watt; equivale aproximadamente al poder de 3 caballos de tiro ó de 7 peones[1].

1. *Horse-power.* — La unidad inglesa de potencia se llama *horse-power* (*caballo-potencia*) y no equivale exactamente al caballo de vapor, pues se eleva á 75,9 kilográmetros por segundo.

Poncelet. — El Congreso internacional de mecánica aplicada adoptó en 1889 una nueva *unidad de potencia,* el *poncelet,* que vale 100 kilográmetros por segundo. Esta presenta la ventaja de tener valor sensiblemente igual al *kilowatt,* que es una unidad correspondiente en electricidad, pues

1 poncelet = 0,981 kilowatt.

Por otra parte, el poncelet está formado con arreglo al sistema decimal y presenta las ventajas de este sistema de numeración.

LIBRO II

GRAVEDAD

MOVIMIENTO Y EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS GRAVES

CAPÍTULO PRIMERO

DIRECCIÓN Y NATURALEZA DE LA GRAVEDAD.

39. **Definición de la gravedad.** — Ya hemos dicho que todos los cuerpos existentes en la superficie de la Tierra *caen* al suelo desde que pierden su sostén ó apoyo. La causa de este movimiento es una fuerza cuyo origen y naturaleza no se conocen *a priori:* la *gravedad.*

Cuanto la simple observación de los hechos ha enseñado acerca de la gravedad, es que se ejerce sin distinción sobre todos los cuerpos sólidos y líquidos, sean cuales fueren las condiciones en que se encuentren colocados : este fenómeno general se ha expresado desde mucho tiempo atrás diciendo que esos cuerpos son *graves* ó *pesados.* Para demostrar que los gases entran también en esta categoría se ha necesitado la intervención de la experiencia. Y si algunos cuerpos no parecen caer, como las nubes que se ciernen en la atmósfera, ó el humo y los globos aerostáticos que suben en ella, esto depende precisamente de que el aire es pesado y de que ejerce sobre los cuerpos sumergidos en él un impulso vertical, ya igual, ya superior á la acción directa de la gravedad.

Cuanto á los caracteres mecánicos de esta fuerza, á su naturaleza y origen físicos, no ha sido posible determinarlos más que mediante estudio experimental y racional de sus efectos.

40. **Dirección de la gravedad. — Plomada.** — La fuerza de la gravedad quedará completamente determinada cuando se conozcan su *dirección* en un lugar dado, su *punto de aplicación* en un cuerpo cualquiera y la *intensidad* de su acción.

Vamos á averiguar primero cuál es su dirección.

La dirección de la fuerza, en un punto cualquiera, estará dada exactamente por la trayectoria que seguiría un cuerpo grave al caer libremente en ese sitio. Esta trayectoria se fija en la atmósfera, ma-

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

terializándola digamos así, con un aparato muy usado en las artes y oficios, la *plomada*.

Compónese de un hilo perfectamente flexible de que se encuentra suspendida una pequeña bala de plomo (fig. 13). Fijando este hilo por su extremidad superior y abandonándolo á sí mismo, toma naturalmente, cuando queda en equilibrio, la dirección de la gravedad. En efecto, por causa de su flexibilidad, sigue exactamente la dirección que le imprime el cuerpo grave, que es la del descenso libre y por tanto de la gravedad.

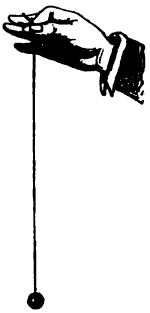


Fig. 13.

De modo que la dirección de la gravedad queda definida experimentalmente por la plomada en equilibrio; geométricamente se la expresa por esta propiedad del instrumento espresado : *La dirección de una plomada en equilibrio es normal á la superficie libre de las aguas tranquilas ó de los líquidos en reposo.* La demostración de esta propiedad se funda en una consecuencia de las leyes de la reflexión de la luz, que admitiremos actualmente sin prueba :

La imagen de una recta luminosa, obtenida en una superficie plana reflectora, es una recta simétrica de la primera respecto del plano del espejo.

Ahora bien, si se suspende una plomada OA sobre un baño de mercurio (fig. 14), normalmente á la superficie plana del líquido, su imagen vista en el mercurio no podrá serle simétrica más que estando exactamente en su prolongación. Fácil es comprobarlo. Basta que un observador coloque otra plomada IB entre su vista y la OA, de modo que esta última quede completamente oculta : así observará que la imagen del hilo queda oculta á la vez que la plomada misma; luego esta imagen se encuentra en el plano determinado por los dos hilos paralelos OA é IB. Tomando otra posición respecto de la plomada OA, el observador llegará á idéntico resultado, es decir, que podrá ocultar al mismo tiempo la plomada OA y su imagen mediante la interposición de la plomada IB : luego esta imagen se encuentra comprendida también en el nuevo plano determinado por OA y la nueva posición de IB. Como esta imagen está al mismo tiempo en dos planos, se encuentra también en su intersección, que es precisamente OA; *luego la imagen de* OA *está en la prolongación misma de* OA : luego la dirección de OA es normal á la superficie plana del mercurio.

Desviación de la plomada — La plomada se desvía sensiblemente de la vertical en las cercanías de una gran masa de materia, como de una montaña ó de núcleo continental. La Condamine y Bouguer observaron que al pie del Chimborazo la desviación es de 7",5 y que llega á 11" junto al monte Schihallien, en Escocia.

41. **Vertical.** — **Horizontal y Horizonte.** — Esta dirección se llama

la *vertical* del lugar. La plomada determina la vertical del punto mismo donde está suspendida.

Plano vertical. — Todo plano que pasa por la vertical de un punto se llama *plano vertical.*

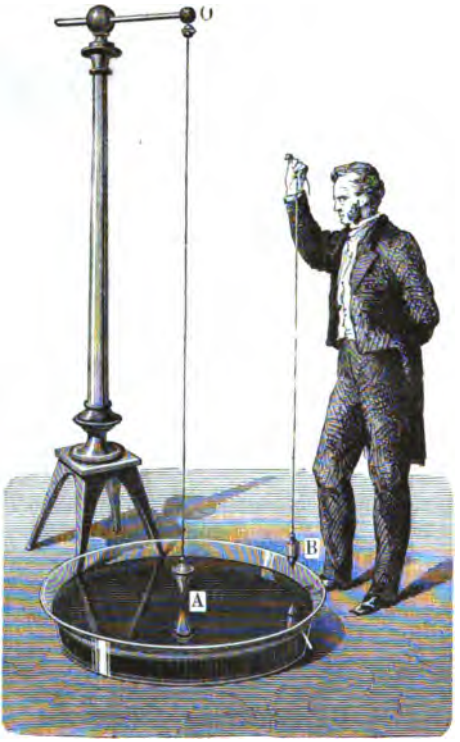


Fig. 14.

Plano horizontal. — Todo plano perpendicular á la vertical es un *plano horizontal.* Por ejemplo, la superficie de las aguas tranquilas, por lo menos en las inmediaciones de la vertical, es un plano horizontal.

Horizontal. — *Horizonte.* — Toda línea trazada en un plano horizontal es una *horizontal.* Llámase *horizonte visual* de un punto ó sencillamente *horizonte*, á la línea circular según la que corta el casquete del cielo el plano horizontal que pasa por la vista de un observador.

Observaciones. — 1°. Si la superficie de las aguas tranquilas fuera plana, todas las verticales de los diferentes puntos serían paralelas entre sí. Pero se sabe que la superficie terrestre, hecha abstracción de las desigualdades accidentales del suelo, es una superficie convexa. La vertical de un lugar es, pues, una recta perpendicular al plano tangente en un punto de una superficie convexa, plano tangente que por lo demás se confunde con la superficie misma en cierta extensión; de aquí resulta que las verticales de los diferentes lugares no son rectas paralelas.

Esta falta de paralelismo es difícil de observar tratándose de pequeñas distancias. Así, dos verticales cuya distancia horizontal es de 31 metros no forman más que un ángulo de 1''. Se necesita una distancia de 1860 metros para formar un ángulo de 1', y de 111 kilómetros para un grado. Las verticales AZ y AZ' ó AZ'', que forman

entre sí un ángulo de 3° próximamente (fig. 15), corresponden á dos puntos que distan entre sí 333 kilómetros. De París á Dunkerque la vertifical se inclina 2°12' y 7°28' entre París y Barcelona[1].

2°. Si la superficie terrestre fuera perfectamente esférica, todas las verticales Z, Z', Z", etc., serían perpendiculares á planos tangentes á la esfera é irían á cortarse en su centro. Podría, pues, decirse que *en cada lugar la gravedad se dirige hacia el centro de la Tierra*. Mas se sabe que nuestro planeta es un globo esferoidal, aplanado en sus dos polos, que además presenta ciertas irregularidades de forma en sus meridianos y paralelos y que está animado de un movimiento de rotación en el sentido directo. De esto resulta que la conclusión precedente sólo es aproximada, porque la dirección de la plomada en cada lugar no depende exclusivamente de la gravedad.

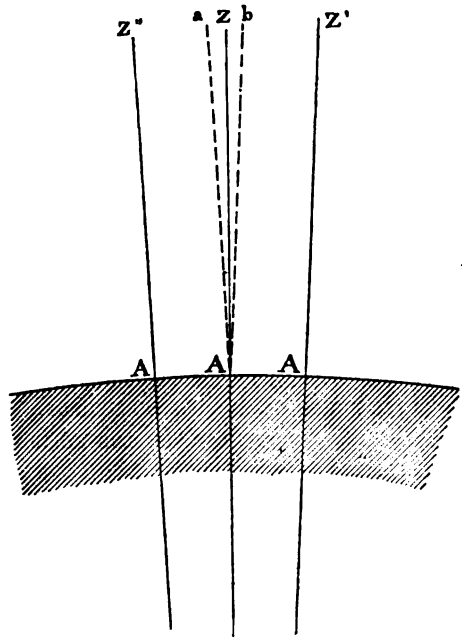


Fig. 15.

42. **Caracteres de la gravedad. — Definición del peso y del centro de gravedad de los cuerpos.** — De que la vertical tiene una dirección constante en un mismo punto del globo podemos deducir ya que el movimiento de los cuerpos que caen es rectilíneo y, por consiguiente, que la causa de este movimiento, quiere decir, la gravedad, es una fuerza *constante en dirección*. El estudio experimental de este movimiento nos demostrará además : 1°. que es idéntico para todos los cuerpos graves, por pequeños que sean ; 2°. que es uniformemente acelerado. De aquí deduciremos que la gravedad es una fuerza *constante en intensidad* como en dirección, y que actúa igualmente sobre todos los cuerpos y sobre todas las partículas de ellos.

1. Estos números han sido calculados despreciando la influencia de la rotación de la tierra sobre la dirección de la plomada en un lugar.

Podemos, pues, representarnos desde ahora á un cuerpo grave como un cuerpo sometido á número considerable de pequeñas fuerzas derivadas de la gravedad. Todas ellas son verticales y están inmediatas unas á otras, por lo cual se puede considerarlas como rigurosamente paralelas. Tienen de consiguiente una resultante única, que es lo llamado el *peso del cuerpo*[1].

El peso está aplicado en un punto del cuerpo, que es el centro de dichas fuerzas paralelas : llámase este punto de aplicación *centro de gravedad*[2] del cuerpo.

Queda por probar que el centro de gravedad es un punto fijo y el peso una fuerza constante para un cuerpo determinado. Esta será una consecuencia inmediata de las leyes del descenso de los graves, que vamos á explicar.

CAPÍTULO II

LEYES DE LA CAÍDA DE LOS CUERPOS. — CENTRO DE GRAVEDAD. EQUILIBRIO DE LOS SÓLIDOS PESADOS.

43. **Enunciado de las leyes.** — El movimiento de los cuerpos que caen se llama *movimiento de descenso* ó sencillamente *descenso* y *caída*. Sus leyes fueron descubiertas experimentalmente por Galileo á fines del siglo XVI. Podemos enunciarlas de la manera siguiente :

1ª. Ley. — *Todos los cuerpos caen en el vacío con igual velocidad.*

Esta ley significa que en el vacío todos los cuerpos, sean cuales fueren su naturaleza, masa y forma, tardan tiempos iguales para caer desde la misma altura.

2ª. Ley de los espacios. — *Los espacios recorridos por un cuerpo que cae libremente en el vacío son proporcionales á los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.*

Esto quiere decir que si el espacio recorrido al cabo de 1 segundo es igual á e_1 metros, los espacios sucesivamente recorridos al cabo de 2ª, 3ª, 4ª... tª serán respectivamente iguales á $4e_1$, $9e_1$, $16e_1$,... t^2e_1.

Corolario. — De esto resulta que el espacio recorrido durante el segundo segundo es $4e_1$ menos e, ó sea $3e_1$; durante el tercer segundo es $9e_1$ menos $4e_1$ ó sea $5e_1$; en el cuarto $16e_1$ menos $9e_1$, ó sea $7e_1$, y así sucesivamente. En consecuencia tenemos que : *Los espacios recorridos sucesivamente durante el primero, el segundo, el tercero, el*

1. Á veces se dice la *gravedad* de un cuerpo ; pero esta locución es viciosa. Debe dejarse la palabra *gravedad* para designar la causa del peso, causa variable en la intensidad de sus efectos, según la cantidad de materia en que actúa. El *peso* es precisamente la medida de esta intensidad.

2. En esta expresión, *gravedad* es sinónimo de peso. Análogamente se dice cuerpos *graves* en vez de cuerpos *pesados*.

cuarto... segundo del descenso están entre sí como la serie natural de los números impares 1, 3, 5, 7,

3ª. Ley de las velocidades. — *Las velocidades adquiridas por un cuerpo que cae libremente en el vacío, son proporcionales á los tiempos empleados desde el principio del descenso.*

Precedentemente se ha visto (18, 3º) lo que conviene entender por *velocidad* en un movimiento variado. Este enunciado significa que si la velocidad, definida así, es igual á v_1 al cabo del 1er segundo del descenso, será igual á $2v_1$ al cabo de 2s, á $3v_1$ al cabo de 3s...., por fin á tv_1 al cabo del tiempo t.

44. Demostración experimental de las leyes.— 1ª Ley.—Varios hechos de observación ordinaria parecen negar esta proposición. Cuerpos de naturaleza diferente y de formas diversas (hoja de papel, bala de plomo, pluma), caen evidentemente en el aire con velocidades muy distintas[1].

Experimento de Galileo. — Galileo fué quien primero atribuyó estas desigualdades de velocidad á la resistencia del aire. Para probarlo hizo lanzar desde la torre inclinada de Pisa cuerpos desigualmente pesados, pero del mismo volumen exterior, balas de plomo, de cobre, de mármol, de cera, y observó que estos cuerpos llegaban al suelo *casi* en el mismo instante.

Experimento de Newton. — Newton completó la demostración de Galileo suprimiendo la resistencia del aire, en vez de contentarse con atenuarla. Al efecto, tuvo la idea de hacer caer cuerpos desigualmente pesados, no ya en el aire sino en el vacío. Su experiencia se repite de la manera siguiente :

Tómase un tubo de vidrio de dos metros de largo próximamente, cerrado en una de sus extremidades por un casquete metálico y terminado en la otra por una tapadera metálica bien adaptada al vidrio con mástic. Esta tapadera se prolonga en forma de un tubo de llave, de cobre, que se puede atornillar en la platina de la máquina neumática. Introdúcense en el tubo antes de cerrarlo una bala de plomo, un fragmento de corcho, un pedazo de papel y algunas barbas de pluma, después de lo cual se hace el vacío. Volviendo entonces bruscamente de arriba abajo el aparato, se ve que todos los cuerpos colocados en él caen juntos sin que ninguno de ellos se adelante ó se retrase respecto de los otros. Pero si se hace penetrar de nuevo en el tubo un poco de aire y se le invierte otra vez, entonces hay un pequeño retraso para los cuerpos más ligeros, retraso que llega á ser considerable cuando se deja entrar el aire por completo. De modo que si en las condiciones ordinarias los diferentes cuerpos caen con velocidad desigual, esto depende sólo de la resistencia del aire, que los retrasa desigualmente en su descenso.

Experimento del martillo de agua. — Esta resistencia se manifiesta sobre todo en los líquidos, que en el aire se dividen cayendo en gotecillas; por el contrario,

1. De aquí dedujo Aristóteles, y los antiguos admitieron, que los cuerpos caen *tanto más de prisa* cuanto *más pesados* son.

en el vacío bajan formando una masa, sin dividirse, lo mismo que un cuerpo sólido. Este fenómeno se prueba con el *martillo de agua*. Dase este nombre á un tubo de vidrio algo grueso, de 30 á 40 centímetros de largo, que se llena de agua en su mitad y que se cierra al fin con la lámpara, después de haber expulsado todo el aire mediante ebullición prolongada (fig. 16). Cuando se invierte bruscamente este tubo, el agua al caer hiere la extremidad inferior con un sonido seco, análogo al de un cuerpo sólido que chocara con la pared cristalina.

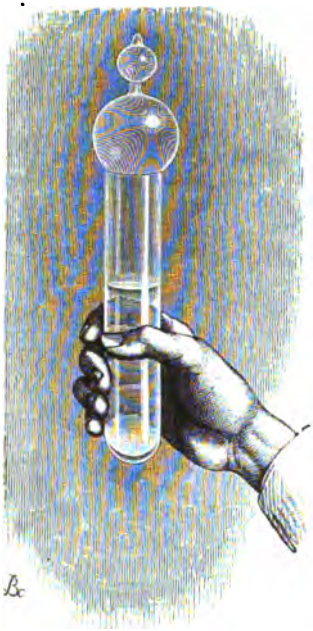


Fig. 16.

2ª y 3ª Ley. — En la demostración de las otras leyes se presentan dos graves dificultades. Primeramente, la rapidez de descenso de un cuerpo que cae libremente hace difícil de observar su movimiento. Además, como no se puede operar en el vacío, la resistencia del aire produce necesariamente una perturbación tanto mayor cuanto más rápida es la caída. Para probar las expresadas leyes con facilidad y rigor ha sido necesario inventar aparatos especiales, que permiten atenuar la dificultad de observación y suprimir la causa de error. Tales son el *plano inclinado de Galileo*, la *máquina de Atwood* y el *aparato de Morin*.

45. **Plano inclinado.** — Galileo fué quien primero resolvió el problema experimental que consiste en atenuar la rapidez del movimiento del descenso de los cuerpos, para hacerlo fácilmente observable sin alterar su naturaleza. En efecto, demostró que « *un cuerpo grave cae al descender la vertical con rapidez mayor que al bajar por un plano inclinado, en la proporción en que la línea de mayor pendiente es más larga que la vertical.* Esta proposición es el principio mismo de su método.

1°. *Principio del aparato.* — Llámase *plano inclinado* á todo plano que forma con otro horizontal un ángulo inferior á un recto.

Sea BAC la sección del plano inclinado por un plano perpendicular al mismo tiempo á él y al horizontal, y por consiguiente á su intersección : el ángulo BAC es el ángulo plano del diedro formado por el plano inclinado con el horizonte (fig. 17) y AB es su *línea de mayor pendiente*. Sea BC una perpendicular bajada desde un punto cualquiera B de la línea AB sobre la línea AC : BC se llama la *altura* del plano inclinado y AB es su *longitud*. Sea por fin M la sección de un cuerpo cualquiera que descansa sobre el plano inclinado : su peso P podrá ser descompuesto en dos fuerzas Q y F, una perpendicular,

otra paralela al plano inclinado. La primera será destruída por la resistencia del plano y no tendrá efecto útil en lo tocante al movimiento; la fuerza F actuará sola sobre la masa M para hacerla bajar. Calcúlase el valor de F llevando sobre GP una longitud GH que represente el peso P, y se acaba el paralelógramo DGEH; la fuerza F queda entonces representada por GD.

Ahora bien, los triángulos DGH y ABC son semejantes por tener sus ángulos iguales. De esto se deduce que

$$\frac{GD}{GH} = \frac{BC}{AB}, \quad ó \quad \frac{F}{P} = \frac{BC}{BA}.$$

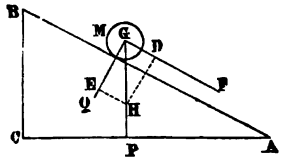


Fig. 17.

Esta igualdad demuestra la proposición de Galileo. Vese en efecto que F es una fracción de P, la cual tiene por numerador la altura del plano y su longitud por denominador. Ahora bien, esta fracción es igual á sen α, siendo α la inclinación BAC. En consecuencia, se puede, aumentando esta inclinación, hacer la fuerza F tan pequeña como se quiera. Por tanto, es dable amortiguar el descenso del móvil M por el plano inclinado, de modo que sea fácil observar los caminos recorridos en 1, 2, 3... segundos. Y el movimiento no se altera en su naturaleza, pues si el peso P es constante y continuo, su componente F lo es también. Cuanto á la resistencia del aire, su influencia perturbadora será tanto menor cuanto más se atenúe la velocidad del descenso.

2°. *Demostración de la ley de los espacios.* — Galileo hizo su plano inclinado practicando en un listón de madera de 7m,20 de largo próximamente, una ranura ó canal bien trazado y muy liso. Bastábale levantar más ó menos una de las extremidades del madero para hacer variar á voluntad la inclinación del plano. El móvil era una bola de bronce duro, muy bien pulimentada; introduciala en la ranura y observaba, no los espacios recorridos al cabo de 1, 2 segundos, etc. sino, cosa equivalente á lo mismo, los tiempos que la bola tardaba en recorrer, primero el canal entero, después 1/4, después 1/9, etc., de su longitud. Descubrió que estos tiempos sucesivos variaban como los números 1, 1/2, 1/3, etc.

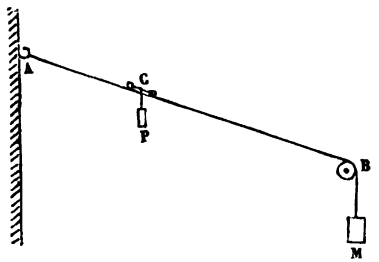


Fig. 18.

Aparato de clase. — Pueden repetirse más sencillamente estas experiencias en las clases tomando como plano inclinado un hilo de seda (fig. 18), tendido oblicuamente entre un clavo A y una pequeña polea B, por medio del peso M, que cuelga de la extremidad libre. A lo largo de este plano inclinado se hace bajar una pequeña carretilla móvil C, formada por dos poleas reunidas y que sostiene un peso P. Dejando caer la carretilla durante tiempos progresivamente mayores se demostrará la ley de los espacios. Haciendo cambiar el punto A donde se ata

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

el hilo, de modo que varíe la inclinación, se probará el principio mismo del aparato.

3°. *Demostración de la ley de las velocidades.* — La ley de las velocidades resulta necesariamente de la de los espacios y es inútil demostrarla. En efecto, Galileo se dispensó esta comprobación. Sin embargo, sería posible realizarla muy sencillamente.

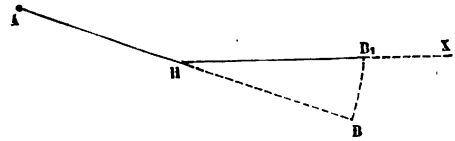


Fig. 19.

Supongamos que en un punto H del plano inclinado (fig. 19) se levante el hilo, de modo que la parte HB_1 quede tendida horizontalmente en la dirección B_1X. Soltando el móvil desde A en el tiempo cero, llegará á H, en el momento t, con cierta velocidad V : sábese que suprimiendo de golpe la fuerza aceleratriz en este punto, el móvil seguirá *moviéndose uniformemente* con esta velocidad V; no habrá, pues, más que medir el espacio recorrido durante 1 segundo á partir del momento t, para obtener la velocidad V en ese momento. Análogamente para obtener la velocidad V' en el instante t', bastará enderezar el hilo á partir del punto que el móvil ha alcanzado en ese instante. De esta manera se probará que las velocidades V, V'.., son sensiblemente proporcionales á los tiempo t, t'. .

46. **Máquina de Atwood.** — El aparato más cómodo para demostrar aproximadamente las leyes del descenso de los graves fué inventado por Atwood[1] : llámasele *máquina de Atwood.*

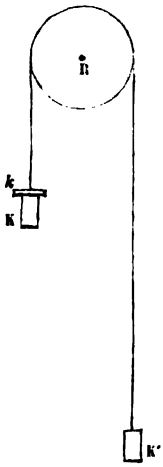


Fig. 20.

Este aparato proporciona, lo mismo que el plano inclinado, medios 1°. de atenuar la velocidad del descenso de los cuerpos sin alterar la naturaleza del movimiento; 2° de disminuir por esta razón misma, en grado considerable, el efecto perturbador de la resistencia del aire.

1°. *Principio.* — Reduciéndola á su órgano esencial, la máquina se compone de una polea R (fig. 20), muy ligera y móvil, por cuya garganta pasa un hilo, perfectamente flexible é inextensible, que sostiene en sus dos puntas dos masas iguales K y K'. Este sistema se encuentra en equilibrio en todas las posiciones relativas de las dos masas, pues el peso del hilo es completamente despreciable comparado con los dos pesos iguales P de éstas. Pero supongamos que se eleve una de las masas K hasta el punto más alto que puede alcanzar, y que se ponga encima de ella una *masa adicional* k, que tenga un peso p. El sistema entero será entonces arrastrado por este aumento de carga, y tomará movimiento evidentemente más lento que en el descenso libre. Con efecto, si el peso p, *supuesto constante*, no actuara más que sobre su propia masa m, según ocurriría en un

1. Profesor de Cambridge en 1784.

descenso libre, le imprimiría un movimiento uniformemente acelerado, cuya aceleración llamaremos g. Actuando sobre la masa m aumentada con las masas M y M' de los cuerpos K, K', imprime también á la masa total $(2\,M + m)$ un movimiento uniformemente acelerado. Sea γ la aceleración de este último. Como las aceleraciones que una misma fuerza imprime á dos masas diferentes son inversamente proporcionales á estas masas, tendremos la relación siguiente entre g y γ

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{m}{2M + m},$$

de donde se deduce

$$[1] \qquad \gamma = g \cdot \frac{m}{2M + m}.$$

Luego γ, esto es, la aceleración de la caída en la máquina de Atwood es una fracción de g, cuyo numerador es m y su denominador $2\,M + m$. Será, pues, tan pequeña como se quiera. Además, si g es constante, quiere decir, si el movimiento en el descenso libre es uniformemente acelerado, γ será también constante : la recíproca es también verdadera [1].

2° *Descripción.* — Una columna de madera (fig. 21) de $2^m,30$ próxima-

Fig. 21.

1. Observación. — En vez de las masas del sistema M, M', m, se consideran más comunmente los pesos, que se determinan directamente. Sábese que para cada uno de los cuerpos graves se tiene la relación

$$m = \frac{p}{g} \qquad \text{y} \qquad M = \frac{P}{g}.$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación precedente, se convierte en

$$[2] \qquad \gamma = g \cdot \frac{p}{2\,P + p}.$$

Por ejemplo, si hacemos $P = 16$ y $p = 1$, se tendrá $\gamma = \frac{1}{33}\,g$ La aceleración será, pues, 33 veces menor.

mente, sostiene en su parte superior la polea R, que es generalmente de cobre, pero que conviene más hacer de aluminio; de ordinario se la cubre con una caja de vidrio. En la polea se arrolla un hilo de seda, bastante fino para que se pueda despreciar su peso; este hilo lleva en sus extremidades dos pesos iguales K, K'. El eje de la polea no descansa sobre dos ejes fijos, sino en los cruces de cuatro ruedas móviles (fig. 22). Gracias á esta disposición, el eje de la polea trasmite su movimiento á las cuatro ruedas y, en vez de un rozamiento de deslizamiento se produce uno rodado, que es mucho más suave.

Fig. 22.

En la parte delantera de la columna se fija un movimiento de relojería H, regido por un péndulo de segundos P, provisto de un escape de áncora. El eje de la rueda dentada, que está regulada por el escape, sostiene en su extremidad anterior una aguja para marcar los segundos, y en la posterior, detrás del cuadrante, un diente (fig. 23), que gira con la aguja en el sentido de la flecha. Este diente puede, apoyándose en la palanca *ba*, hacer bascular un platillo *n*, donde se coloca el cuerpo *m* cuyo descenso se quiere observar. Este platillo, móvil en torno de un eje horizontal, tiende á oscilar espontáneamente por su propio peso; mas se le mantiene horizontal mediante un calzo *i* de que está provisto, que descansa en la extremidad superior *a* de la palanca *ab*, mientras éste se encuentra en su posición normal. Desde que el diente hace apartarse la extremidad *b* de la palanca, la extremidad *a* abandona el calzo y el platillo *n* báscula dejando caer el peso que sostenía. El sistema está arreglado de manera que el descenso empieza en el momento preciso en que la aguja del cuadrante H llega al cero de la graduación.

Por fin, paralelamente á la columna se encuentra fija una regla de madera dividida en centímetros, y que está destinada á medir los espacios recorridos por el cuerpo que cae. En esta escala hay dos *correderas* A y B, es decir, dos piezas móviles que se pueden poner á la altura deseada, mediante tornillos de presión. Las figuras 23 á 29 las representan en diferentes posiciones. Una de ellas, A, sostiene un disco entero, que sirve para detener al móvil en un instante cualquiera de su descenso: es la *corredera llena*; la otra B está taladrada como un anillo, y es la *corredera hueca*. Esta se deja atravesar por el cuerpo que cae, pero detiene al paso el peso adicional, que consiste en una lámina de latón *m* (fig. 29), más larga que el diámetro interior del anillo.

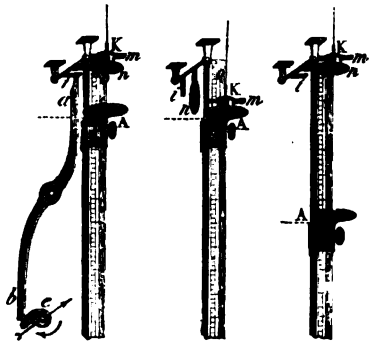


Fig. 23. Fig. 24. Fig. 25.

3°. *Demostración de la ley de los espacios.* — El péndulo P está parado y la aguja del cuadrante detenida á la izquierda del cero. Pónese el peso adicional *m* sobre el peso *k*, y este, así cargado, se coloca encima del platillo *n* (fig. 23), mantenido horizontalmente frente al cero de la escala. En seguida se suelta el balancín del reloj; la aguja recorre su cuadrante, y cuando pasa por el cero, la plataforma baja automáticamente, dejando caer el peso. Entonces se mueve la corredera llena á lo largo de la escala graduada hasta que pare al cuerpo al cabo del primer segundo de descenso. Esto no se logra sino después de varios tanteos. La buena posición se encuentra (fig. 24) cuando el choque del peso contra la corredera coincide con la segunda oscilación del balancín (á partir del cero).

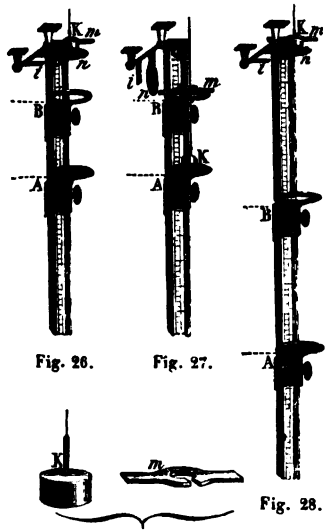


Fig. 26. Fig. 27. Fig. 28.

Fig. 29.

La distancia de la corredera al cero de la escala representa el espacio recorrido durante el primer segundo. Supongámoslo igual á

7 divisiones. Recomencemos entonces la experiencia de la misma manera, pero no parando el peso hasta el fin del segundo segundo. Obsérvase que para ello precisa colocar la corredera llena precisamente frente á la 28ª división de la escala (fig. 25) : luego el espacio recorrido en dos segundos es igual á 4 veces 7 divisiones, es decir, al cuádruplo del espacio recorrido durante 1 segundo. Hállase análogamente que una altura 9 veces mayor, ó de 63 divisiones, es recorrida en 3 segundos, y así sucesivamente : queda, pues, demostrada la ley de los espacios.

4°. *Demostración de la ley de las velocidades.* — Precisa recordar que en el movimiento variado se entiende por velocidad en un instante dado la del movimiento uniforme que sucedería al variado si en este instante se suprimiera la fuerza aceleratriz (29). Por consiguiente, para probar la ley basta con medir las velocidades de los movimientos uniformes que reemplazan al movimiento acelerado, sucesivamente después de 1, 2, 3.. segundos de descenso.

Para ello se empieza por colocar la corredera anular B á una distancia tal (fig. 26), que el sistema móvil tarde 1 segundo en llegar á ella. Como entonces el peso adicional es detenido por la corredera B (fig. 27), el peso K continúa bajando solo. Procúrase por medio de tanteos pararlo con la corredera llena precisamente á los dos segundos. La distancia entre las dos correderas representa entonces la velocidad adquirida al cabo de un segundo de descenso.

En otra experiencia, se coloca la corredera anular B á una distancia 4 veces mayor que la primera vez (fig. 28), de manera que el peso adicional no sea detenido sino á los dos segundos de descenso. Procurando entonces detener el sistema al cabo del tercer segundo con la corredera llena, se encuentra que es preciso colocarla á una distancia de B doble de la que los separaba antes. Luego la velocidad adquirida al cabo de dos segundos es doble de la que el móvil adquirió después de 1 segundo. Pruébase de la misma manera que después de 3, 4, 5 segundos de descenso esta velocidad es 3, 4, 5 veces mayor : luego, queda demostrada la tercera ley.

47. **Demostración de los principios de dinámica.** — La máquina de Atwood puede servir para demostrar fácilmente uno de los teoremas fundamentales de la dinámica, á saber que *las aceleraciones* $\gamma, \gamma' \gamma''$... *impresas á una misma masa por diversas fuerzas* constantes F, F', F''... *son proporcionales á las intensidades de estas fuerzas* (31,2°).

Tómanse dos masas K y K', formadas ambas por cierto número de discos de latón, que tienen el mismo peso p que la masa adicional.

Primer experimento. — K y K' están formadas, pongamos como ejemplo, por 16 discos cada una. Pónese encima de K el peso adicional p, y se observa el movimiento. Sea e_1 el espacio medido al cabo de un segundo : de ahí se deduce $\gamma = 2e_1$.

Segundo experimento. — Se quita uno de los discos de K' y se le pone sobre K. La masa total del sistema no ha cambiado, pero la fuerza aceleratriz, que es siempre igual á la diferencia de los dos pesos, se ha convertido en $3p$,

$$18p - 15p = 3p,$$

es decir, que es triple de lo que era antes. Observemos el movimiento; sea e'_1 el

espacio medido al cabo de 1 segundo; de ahí se deduce $\gamma' = 2e'_1$. Comparando γ' con γ, se ve que $\gamma' = 3\gamma$.

Tercer experimento. — Se quita á K' otro disco para colocarlo sobre K. La masa total no cambia, pero la fuerza aceleratriz pasa á ser $5p$; es cinco veces mayor que en el primer experimento. Midiendo el espacio e''_1, se deduce de ahí $\gamma'' = 2e^2_1$, y se ve que $\gamma'' = 5\gamma$.

Estos tres experimentos prueban perfectamente que las aceleraciones son proporcionales á las fuerzas aceleratrices.

Aparato de Morin. — 1°. *Principio del aparato.* — Este aparato, cuya idea primitiva se debe á Poncelet, se funda en un principio enteramente distinto de los

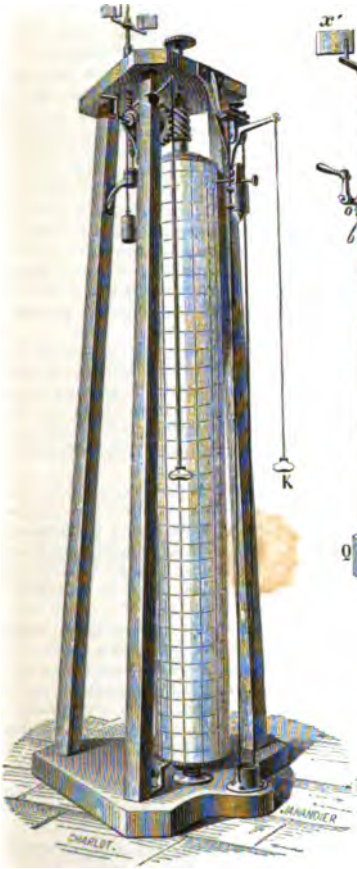


Fig. 30.

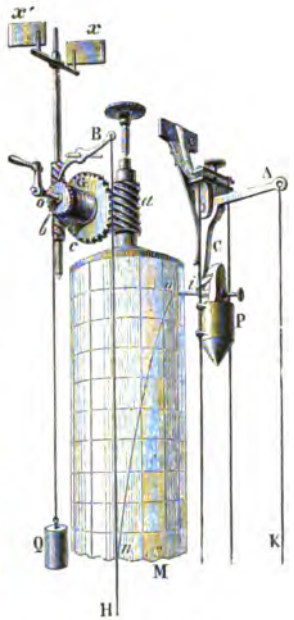


Fig. 31.

precedentes. No sirve para moderar la velocidad del móvil que cae, sino que obliga al cuerpo á trazar por sí mismo lo que se denomina un *diagrama* ó un *gráfico* de su movimiento, esto es una curva que permite estudiar geométricamente todas las particularidades del descenso y determinar sus leyes. Cuanto á la influencia perturbadora del aire, resulta eliminada por la escasa duración del experimento: el móvil no cae sino durante una fracción de segundo y su velocidad no tiene tiempo de llegar á ser bastante grande para que la resistencia del aire pueda retardarla sensiblemente. El aparato de Morin pertenece á la categoría de los registradores, de que veremos multitud de ejemplares en acústica, telegrafía y meteorología.

2°. *Descripción.* — Una armadura de madera (fig. 30 y 31) sostiene verticalmente un cilindro de palo también M, muy ligero y que puede girar libremente sobre dos ejes. Antes de cada experimento se cubre la superficie del cilindro con una hoja de papel, pautado en cuadrados ó rectángulos. Se pega esta hoja de manera que una de las direcciones de los lados sea horizontal y por consiguiente vertical la otra. Las verticales servirán para medir el espacio recorrido por el cuerpo que cae á lo largo del cilindro, y las horizontales para dividir la duración del descenso en intervalos iguales.

El móvil es una masa de fundición P, que lleva un lápiz *i* apretado contra el papel por un pequeño resorte (fig. 31). Esta masa es dirigida en su descenso por dos alambres de hierro muy tensos que pasan por ojetes hechos en ambos lados. La misma masa presenta en su parte superior un diente que se apoya en la extremidad de una palanca acodillada AC. En consecuencia, si se tira de un cordón K atado á la palanca, éste suelta el diente, y la masa P empieza su caída.

Cuanto á la rotación del cilindro, se obtiene mediante un peso Q suspendido de una cuerda que se arrolla en un torno G (fig. 31). El eje de éste lleva en un extremo una rueda dentada *c* que impulsa dos tornillos sin fin *a* y *b*, el primero de los cuales hace girar el cilindro mientras el otro pone en movimiento dos aspas *x* y *x'*. En la otra extremidad del torno se halla una rueda *o* en cuyos dientes penetra la extremidad de un punzón B, que impide girar al torno y á todo el sistema. Pero tirando de un cordel atado al punzón se deja en libertad la rueda *o*, el peso Q baja y todo el sistema se pone en movimiento. Este es primero acelerado, puesto que lo produce el descenso de un cuerpo grave; pero el aire opone á las aspas una resistencia que crece con mucha mayor rapidez que la velocidad de rotación, de modo que la aceleración impresa por la gravedad acaba anulándose y la rotación se convierte en uniforme. Este resultado se ha obtenido cuando el peso Q ha recorrido próximamente las tres cuartas partes de su camino.

3°. *Operación.* — Estando mantenido el móvil en lo alto del aparato se deja que el lápiz se apoye sobre el papel mientras se hace girar con la mano el cilindro: así se traza un círculo en el cual se encontrará un punto de partida del móvil. Entonces se retira el lápiz hacia atrás aunque dejando al móvil en su sitio y se suelta el peso para que comience el movimiento de rotación del cilindro. Cuando se calcula que este movimiento se ha hecho uniforme, tírase vivamente del cordel K y la masa P cae verticalmente.

Si el cilindro M fuera fijo, el lápiz trazaría sobre el papel una línea recta que sería una generatriz del cilindro; pero como éste da vueltas con movimiento uniforme, lo que resulta es una curva *mn* (fig. 32). Esta curva es la trayectoria del movimiento resultante de los otros dos, á saber del movimiento uniforme del cilindro y del movimiento desconocido del cuerpo grave. El estudio de esta curva es lo que va á permitir que comprobemos las leyes de la caída de los cuerpos.

4°. *Demostración de la ley de los espacios.* — Se corta la hoja de papel según una generatriz, y se la retira del cilindro: si entonces se la desarrolla sobre un plano, se obtiene sensiblemente la curva trazada con una línea llena en la figura 32. Las longitudes *ma*, *ma'* *ma''* *ma'''*, contadas en el círculo de partida, rectificado á partir de su origen, son proporcionales á los tiempos 1, 2, 3... y pueden representar estos tiempos; las rectas *ac*, *ac'*, *ac''*, *ac'''*.... representan los espacios recorridos respectivamente por el móvil durante estos intervalos de tiempo. Ahora bien, si se toma como unidad de longitud la dimensión *ac*, esto es, si la suponemos igual á 1, se ve que $a'c'$ vale 4, que $a''c'' = 9$, que $a'''c''' = 16$: lo cual prueba que los espacios *ac*, *a' c'*, *a'' c''*... crecen como los cuadrados de los tiempos 1, 2, 3, 4....

5°. *Determinación gráfica del vértice de la curva.* — La relación precedente puede expresarse como sigue: *Las distancias de los puntos de la curva á una perpendicular al eje, trazada por su vértice son proporcionales á los cuadrados de las distancias de estos mismos puntos al eje.* Esta propiedad geométrica define la curva llamada *parábola*. Así, el *diagrama* del descenso es una rama de *parábola*, el punto *m* es su vértice, la recta *m* X, dirección del movimiento uniformemente acelerado su eje, y la recta *m* Y, dirección del movimiento uniforme, su tangente en el vértice.

Aprovéchase esta observación para determinar con precisión el vértice de la

curva, que siempre es incierto, Para ello basta aplicar una de las propiedades geométricas de la parábola. Si se trazan las tangentes en dos puntos c' y c''

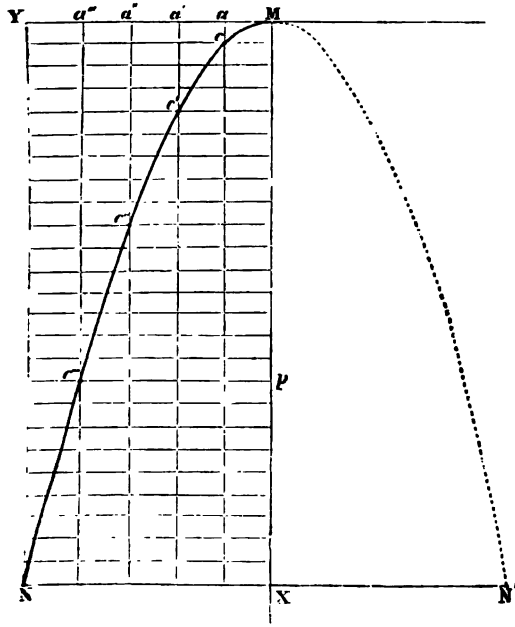


Fig. 32.

(fig. 33), y se les levantan respectivamente perpendiculares en los puntos t' y t'' donde cortan la tangente en el vértice, estas rectas se cortan en un mismo punto

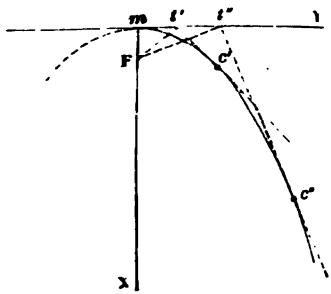


Fig. 33.

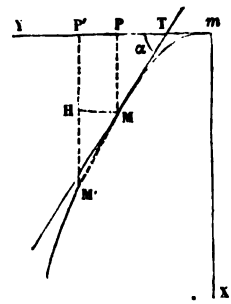


Fig. 34.

del eje que es el foco de la parábola. Bajando desde este punto una perpendicular á la tangente en el vértice, el punto de intersección será exactamente el vértice de la curva y por consiguiente el origen de los espacios.

6°. *Demostración de los principios de cinemática.* — La identidad de este diagrama con una parábola demuestra experimentalmente un teorema relativo á la composición de dos movimientos rectilíneos, uno de los cuales es uniforme y el otro uniformemente variado sin velocidad inicial : se ve que el movimiento resultante tiene como trayectoria una parábola orientada del modo que la curva *mn*.

7°. *Demostración de la ley de las velocidades.* — Demuéstrase fácilmente que trazando la tangente en M á la curva, y buscando en las tablas la tangente trigonométrica del ángulo α (fig. 34), se tendrá una magnitud proporcional á la velocidad del móvil en el momento t. Análogamente, haciendo la misma construcción para otro punto M' de la curva, se tendrá una magnitud proporcional á la velocidad V' en el instante t'. Tomando la relación $\frac{tang\ \alpha}{tang\ \alpha'}$ se comprobará que es igual al cociente $\frac{t}{t'}$.

49. **Experiencias de Cailletet y de Colardeau en la torre Eiffel.** — Estos físicos han instalado en la segunda plataforma de la torre Eiffel un sistema experimental que les permite estudiar el descenso libre de los graves teniendo en cuenta la resistencia del aire. Así han llevado á la práctica una inmensa máquina Morin de 120 metros de altura. Su método consiste efectivamente en determinar la ley del movimiento de descenso por el estudio de un *gráfico* trazado por el cuerpo que cae y que indica su posición en el espacio á cada momento de su bajada.

El móvil M (fig. 35) está atado en la extremidad de un hilo muy fino y ligero que le sigue en su movimiento y sólo le opone escasísima resistencia. Este hilo

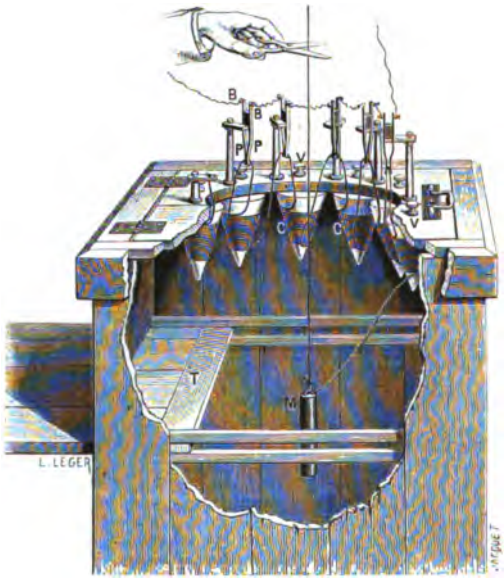


Fig. 35.

está dividido en secciones de 20 metros, cada una de las cuales se encuentra arrollada en un cono de palo C, fijo verticalmente y con la punta vuelta hacia abajo; concíbese que el hilo, arrastrado verticalmente por el descenso del móvil, puede desarrollarse sin rozamiento, digámoslo así, por causa de la forma cónica de los ovillos. La experiencia empieza desde que se corta el hilo vertical de suspensión (fig. 35). La extremidad final de cada ovillo pasa por el intervalo libre

que dejan entre sí los dos brazos metálicos P, P, de una especie de pinzas Cuando se ha desarrollado el primer ovillo C, el hilo separa un instante las ra-

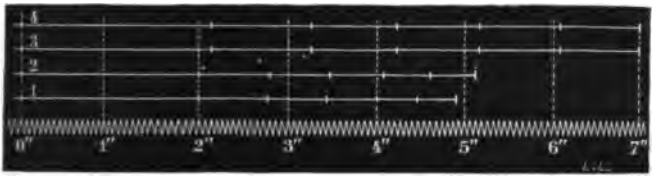


Fig. 36.

mas de la pinza : en este momento preciso la pluma del registrador deja una marca en el cilindro giratorio y el segundo ovillo empieza á desarrollarse á su vez. La segunda pinza se abre después de un nuevo desarrollo de 20 metros y así sucesivamente. De esta manera se conocen, por tanto, los tiempos sucesivos al cabo de los cuales ha recorrido el móvil espacios de 20, de 40, de 60 metros, etc.

La figura 36 representa el gráfico de varias experiencias :

1. Trazado teórico del descenso de un cuerpo que cae libremente en el vacío ;

2. Trazado experimental del descenso de una larga flecha de madera, lastrada con una masa metálica puntiaguda ;

3. Caída de un plano cuadrado de $0^{mq},0225$, lastrado con una masa de 800 gramos (fig. 37) ;

4. Descenso de un plano triangular de igual superficie y con el mismo lastre ;

5. Trazado de las vibraciones del diapasón que sirve para medir los tiempos de caída.

Las primeras experiencias de Cailletet y Colardeau tuvieron sobre todo por objeto comprobar la precisión de sus aparatos, la exactitud de su funcionamiento y el valor práctico del método. Presentan mucho interés práctico, porque permitirán resolver gran número de dificultades que se encuentran á cada instante en diversas aplicaciones : resistencia del aire á los trenes de camino de hierro y á los navíos en marcha, dirección de los globos, problema de la aviación, influencia del viento en las construcciones, utilización de la fuerza motora del viento, etc.

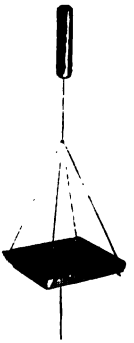


Fig. 37.

50. **Conclusiones.** — 1°. *Naturaleza de la gravedad.* — De todas las experiencias precedentes resulta que las leyes del descenso de los cuerpos son idénticas á las del movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado. Luego, dentro de los límites en que estas leyes han sido comprobadas, *la gravedad*, que causa la caída de los cuerpos, *es una fuerza constante en magnitud y dirección.*

2°. *Ecuación del descenso de los graves.* — Las ecuaciones generales que expresan el movimiento uniformemente acelerado se aplican, por tanto, á la caída de los cuerpos en el vacío. Llamando g á la aceleración de la gravedad en un punto del globo, se tiene para la ley de las velocidades

[1] $$v = gt$$

y para la de los espacios

[2] $$e = \frac{1}{2} g t^2.$$

3°. *Fórmulas usuales.* — I. Si en la ecuación [2] se hace $t = 1$, resulta

$$e = \frac{1}{2} g, \qquad \text{de donde} \qquad g = 2e,$$

es decir que *la aceleración debida á la gravedad es igual al doble del espacio recorrido durante el primer segundo del descenso.*

II. En la ecuación [1] la velocidad v está expresada en función del tiempo; pero también se puede expresarla en función del espacio recorrido, eliminando t entre las ecuaciones [1] y [2]. Para esto se saca de la primera

$$t = \frac{v}{g}, \qquad \text{de donde} \qquad t^2 = \frac{v^2}{g^2}.$$

Llevando este valor de t^2 á la igualdad [2], se tiene

$$e = \frac{1}{2} g \times \frac{v^2}{g^2}, \qquad \text{de donde} \qquad e = \frac{v^2}{2g}.$$

De ahí se deduce $v^2 = 2ge$ y, extrayendo la raíz cuadrada,

$$[3] \qquad v = \sqrt{2ge}.$$

Se ve, pues, que *cuando un cuerpo cae libremente en el vacío, la velocidad adquirida en un instante dado es proporcional á la raíz cuadrada de la altura del descenso.*

4°. *Intensidad de la gravedad.* — Debe definirse la intensidad de la gravedad diciendo que es *la acción que ésta ejerce sobre la unidad de masa*, ó de otro modo, *el peso de la unidad de masa.* Ahora bien, la ecuación general que enlaza las fuerzas con las aceleraciones pasa á ser, en el caso de la gravedad $P = Mg$, siendo P el peso del cuerpo cuya masa es M y g la aceleración del descenso libre en el vacío. Si se supone $M = 1$, se tiene $P = g$: es decir que *la intensidad de la gravedad está representada por el mismo número que la aceleración del movimiento por ella producido.* He ahí por que se llama con frecuencia á la constante g *intensidad de la gravedad.*

51. **Centro de gravedad de los cuerpos homogéneos.** — La demostración de las leyes del descenso de los graves justifica las definiciones que hemos dado precedentemente :

1°. Del *peso* de un cuerpo, resultante de las fuerzas de la gravedad que están aplicadas á él ;

2°. Del *centro de gravedad*, punto de aplicación de esta resultante.

El centro de gravedad disfruta de todas las propiedades geométricas de un centro de fuerzas paralelas. Su posición en el cuerpo no depende, pues, ni de la dirección común de las fuerzas paralelas,

ni de su intensidad absoluta. Por consiguiente, no variará cuando se cambie la orientación del cuerpo respecto de la vertical del lugar, ni cuando se transporte el cuerpo á otro punto de latitud y altura sobre el nivel del mar diferentes. En general se encuentra determinada en cada cuerpo por su forma exterior y el modo de repartición de su masa.

Lo más interesante de estudiar, en este punto de vista, es el caso de los *cuerpos homogéneos*. Llámanse así á los cuerpos que tienen su materia uniformemente repartida en toda su extensión, de modo que una parte cualquiera del cuerpo tenga una masa proporcional á su volumen. Según la ecuación $P = Mg$, que relaciona al peso con la masa, se ve que el peso de una porción de cuerpo homogéneo es igualmente proporcional á su volumen.

La posición del centro de gravedad en los cuerpos homogéneos no depende sino de la figura del cuerpo. Si esta figura es geométrica, la investigación de cuál sea ese punto es un problema de geometría ó de análisis, más ó menos complicado, pero siempre posible. Si el cuerpo, aun siendo homogéneo no se encuentra limitado por una superficie geométrica, no por esto deja de existir su centro de gravedad; pero no se le puede determinar más que de manera aproximada.

52. **Centro de gravedad de los sólidos geométricos.** — 1°. *Caso de los cuerpos que tienen centro.* — Dícese que un cuerpo posee un *centro de figura*, ó sencillamente *un centro*, cuando en este cuerpo existe un punto que divide en partes iguales todas las cuerdas que pasan por él y que van á terminar en la superficie. Tales son, pongamos por ejemplo, la *esfera*, el *paralelepípedo*, el *cilindro circular recto*.

Desde luego se comprende que un cuerpo así puede descomponerse en grupos de dos masas, iguales é igualmente distantes del centro, como m y m' (fig. 38). Estas masas se encuentran solicitadas por sus pesos p, fuerzas iguales y paralelas, que se componen en una fuerza doble $2p$, aplicada en el punto medio de la línea mm'. La resultante total de las fuerzas $2\,p$ correspondientes á cada grupo será el *peso total* del cuerpo, y estará necesariamente aplicada en el punto G : luego el centro de gravedad coincide con el de figura. Así, cuando un cuerpo homogéneo *tiene un centro de figura, con él coincide el centro de gravedad.*

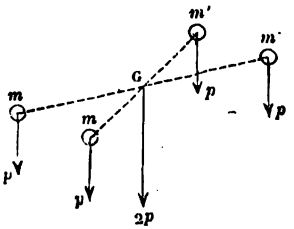


Fig. 38.

2°. *Cuerpos de plano diametral ó de plano de simetría.* — Es evidente que todo cuerpo homogéneo que posee un plano diametral ó un plano de simetría puede descomponerse en pares de masas iguales,

como m y m' (fig. 39) á las cuales se aplican fuerzas iguales p y p, cuya resultante $2\,p$ tiene su punto de aplicación en el centro C de la línea mm'. El peso del cuerpo, que es la resultante total de todas estas resultantes parciales, tendrá necesariamente su punto de aplicación G, que es el centro de gravedad, en alguna parte del mismo plano. Así pues, *cuando un cuerpo homogéneo tiene un plano diametral, ó un plano de simetría, el centro de gravedad del cuerpo se encuentra siempre en este plano.*

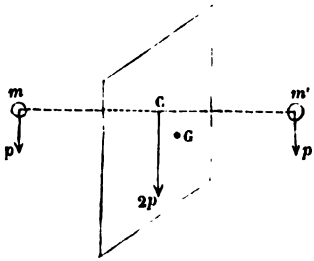


Fig. 39.

Ejemplo. — *Caso de un tetraedro. — El centro de gravedad se encuentra en la línea que va de uno de los vértices al punto de reunión de las medianas en la cara opuesta, y á las tres cuartas partes de esta línea, contando desde el vértice.*

En efecto, sea el tetraedro SABC (fig. 40), M y M' los puntos medios de los lados BC y AC. El plano SAM es diametral para las cuerdas paralelas á la arista BC : luego el centro de gravedad G se encuentra en este plano ; lo mismo ocurre con el plano SBM', que es diametral para las cuerdas paralelas á la arista AC : luego está en la línea SO, intersección de los dos planos.

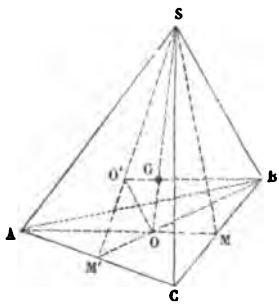


Fig. 40.

Observemos que esta línea SO une el vértice S con el punto de encuentro O de las medianas de la cara opuesta. Por consiguiente, si se hubiera tomado el vértice B en lugar del S, se habría demostrado de la misma manera que el centro de gravedad del sólido debe encontrarse en la línea que une este vértice B con el punto de encuentro O' de las medianas de la cara opuesta : luego, se encuentra en G, punto de intersección de estas dos rectas. Demuéstrase fácilmente que la longitud OG es igual á un cuarto de la longitud SO.

53. Centro de gravedad de las superficies y las líneas. — Se ha generalizado la noción, puramente física, del centro de gravedad, extendiéndola á los casos, exclusivamente geométricos é ideales, de las superficies y de las líneas.

Una superficie que no tiene grueso, y una línea, que sólo tiene una dimensión, no pueden ser pesados y carecen en consecuencia de centro de gravedad. Pero es lícito imaginarse que la superficie y la línea estén divididas, una en elementos superficiales, y la otra en elementos lineales, á que se suponen aplicados pesos proporcionales á sus dimensiones. Estas fuerzas virtuales tienen una resultante igual á su suma y cuyo punto de aplicación se llama *centro de gravedad* de la superficie ó de la línea.

Los principios anteriores se aplican á los casos de las superficies y de las líneas. Así pues, *en toda figura plana que tiene un centro, un diámetro ó un eje de simetría, el centro de gravedad su encuentra en este punto ó sobre esta recta.*

Fundándose en este lema preliminar, se demuestran fácilmente las proposiciones que siguen :

El centro de gravedad se encuentra colocado :

Tratándose de una porción de recta, *en su punto medio ;*

Si de una circunferencia ó de un círculo, *en su centro ;*

Si de la superficie de un triángulo, *en el punto de reunión de sus medianas ;*

Si del perímetro de un triángulo, *en el punto de cruce de sus bisectrices ;*

Si de un paralelógramo ó de un rectángulo, *en el punto de intersección de las diagonales*, que es el *centro de figura.*

Por consiguiente, se obtendrá el centro de gravedad de un polígono cualquiera descomponiendo su superficie en triángulos y en paralelógramos, y el de una superficie geométrica cualquiera dividiéndola en una serie de elementos cuya suma le sea igual, y buscando el punto de aplicación de la resultante de todos estos pesos elementales.

Observación. — La noción del centro de gravedad de las superficies puede servir para simplificar ciertos enunciados relativos á los centros de gravedad de los cuerpos sólidos. Así, se dirá por ejemplo que : *El centro de gravedad de un prisma triangular es el centro de la recta que une los centros de gravedad de las dos bases.*

54. Equilibrio de los cuerpos graves. — La consideración del centro de gravedad permite formular simplemente las condiciones de equilibrio de los cuerpos sólidos graves[1].

1°. *Condiciones de equilibrio.* — La acción de la gravedad sobre un cuerpo se reduce siempre á una fuerza única, vertical, dirigida de arriba abajo, y aplicada en su centro de gravedad : luego, para que haya equilibrio, *es necesario y suficiente que esta fuerza quede destruída por la resistencia de un punto fijo por donde pase.* En consecuencia, si el cuerpo está suspendido por un punto único ó descansa en un solo punto de apoyo, el centro de gravedad debe encontrarse en la vertical de este punto ; si el cuerpo está colgado por dos puntos, la vertical del centro de gravedad debe cortar á la recta que los une ; si el cuerpo está sostenido por varios puntos, la vertical del centro de gravedad debe pasar por la parte interior del *polígono de sustentación :* llámase así al polígono que se obtiene uniendo unos con otros los puntos de apoyo.

En las torres de Pisa y de Bolonia, tan inclinadas sobre el horizonte que parecen amenazar á los transeuntes con su desplome, subsiste el equilibrio porque la vertical del centro de gravedad del edificio pasa por dentro de la base.

Un hombre está tanto más firme sobre sus pies cuanto mayor es la base de sustentación que éstos abarcan, pues entonces puede dar á sus movimientos más amplitud, sin que la vertical trazada por su centro de gravedad se encuentre fuera de esta base. Si descansa en un pie solo, su estabilidad disminuye; y más aun si se pone de puntillas. En esta posición, el menor balance basta para que su centro

1. En realidad todos los cuerpos son *graves*, y este calificativo aplicado á los sólidos es un pleonasmo ; pero se acostumbra designar de esa manera á los cuerpos cuando se les considera como sometidos *únicamente* á las fuerzas de la gravedad.

de gravedad no tenga la vertical en la base y para que pierda el equilibrio.

2°. *Condición de estabilidad.* — Según sea la posición del centro de gravedad respecto de los puntos de apoyo, así se presentan tres estados de equilibrio; el estado de *equilibrio estable*, el de *equilibrio inestable* y el de *equilibrio indiferente.*

El *equilibrio estable* es el estado de un cuerpo que, desviado de la posición de equilibrio, vuelve á ella desde que ningún obstáculo se opone. De manera general, *la estabilidad es máxima cuando el centro de gravedad del cuerpo está más bajo que en cualquier otra posición cercana.*

Concíbese en efecto que si entonces se mueve el cuerpo, su centro de gravedad no puede hacer más que subir, y como la gravedad tiende constantemente á bajarlo, lo lleva otra vez, después de una serie de oscilaciones, á su posición primitiva y el equilibrio se restablece. Tal es el caso de un balancín de reloj ó el de un huevo colocado sobre un plano horizontal, cuando su eje mayor es paralelo á este plano.

Se fabrican pequeños aparatos para patentizar la tendencia que tiene el centro de gravedad á colocarse lo más bajo posible. Citaremos, por ejemplo, el disco de madera que lleva lateralmente una masa de plomo (fig. 41). Si se le coloca en un plano ligeramente inclinado, en una posición tal que la vertical del centro de gravedad G caiga algo por delante del punto de contacto O, se verá que el disco sube el plano inclinado en vez de bajar. Después se para, volviendo á caer cuando la vertical del centro de gravedad G_1 pase por el punto de contacto O_1. Obsérvese que, en realidad, durante la ascensión del disco su centro de gravedad *bajó* de G á G_1.

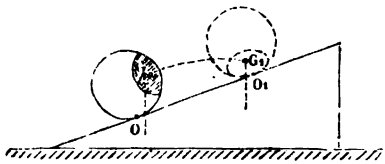


Fig. 41.

El equilibrio *inestable* es el estado de un cuerpo que, apartado de su posición de equilibrio, no tiende sino á alejarse más aun de ella. Esto ocurre cada vez que *el centro de gravedad del cuerpo se encuentra más alto que en cualquier otra posición cercana.*

Compréndese en efecto que si el centro de gravedad baja por razón de un movimiento cualquiera, la gravedad tiende á hacerlo bajar todavía más. Así ocurre con un huevo colocado sobre un plano horizontal de modo que su eje mayor sea vertical, ó con el de un bastón que se mantiene en equilibrio derecho sobre un dedo.

Por fin, se llama *equilibrio indiferente* al que persiste en todas las posiciones que toma un cuerpo. Este género de equilibrio se observa cuando el centro de gravedad del cuerpo no sube ni baja en las diferentes posiciones que éste toma. Así ocurre con una rueda de

coche sostenida por su eje, ó con una esfera que descansa en un plano horizontal.

La figura 42 representa tres conos, A, B, C, colocados respectiva-

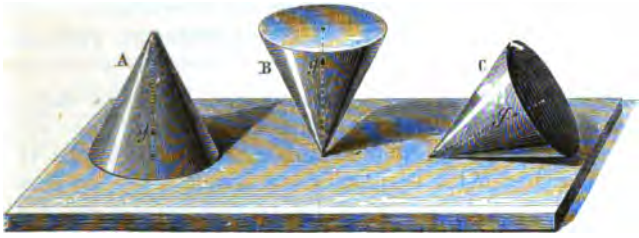


Fig. 42.

mente en las posiciones de equilibrio estable, inestable é indiferente : la letra *g* designa en ellos la posición del centro de gravedad.

55. **Determinación empírica del centro de gravedad de los cuerpos sólidos.** — Sea un cuerpo sólido cualquiera, homogéneo ó heterogéneo. Suspéndesele de una cuerda, sucesivamente en dos posiciones diferentes (fig. 43 y 44); después se busca el punto en que el cordel CD, en la segunda posición, va á cortar la dirección AB que tenía en la primera. Efectivamente, en cada posición el equilibrio no puede lograrse sino en cuanto va á colocarse el centro de gravedad en la vertical del punto de amarre de la cuerda; de ahí resulta que el centro de gravedad debe hallarse al mismo tiempo en las dos direcciones de la cuerda y, por consiguiente, en su punto de intersección.

Fig. 43.

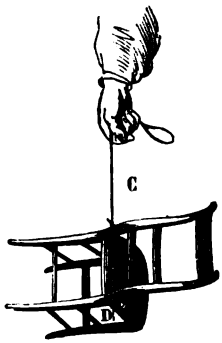


Fig. 44.

Si se trata de un cuerpo de masa considerable, se procura ponerlo en equilibrio sobre el filo de una cuchilla grande de acero. Así que se logra, el plano vertical que pasa por esta arista contiene necesariamente el centro de gravedad. Hácese lo mismo en otras dos posiciones del cuchillo. El punto único de intersección de los tres planos verticales que corresponden á las tres posiciones del filo del cuchillo es el centro de gravedad.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA GRAVEDAD. — PÉNDULO. EXPERIENCIAS DE BORDA. — APLICACIONES DEL PÉNDULO.

56. **Métodos diversos para determinar** g. — Hemos demostrado que la intensidad de la gravedad está representada por el mismo número que la aceleración g de la caída de los cuerpos en el vacío. De consiguiente, todos los medios que nos han servido para comprobar las leyes del descenso de los cuerpos podrían ser utilizados para calcular g.

Pero estos cálculos envuelven numerosos errores, debidos á los rozamientos de los órganos y á la resistencia del aire, que quitarían toda exactitud al resultado final. Así es que para averiguar el valor de g con exactitud se ha recurrido á otro método, derivado de las leyes del movimiento pendular y que se funda en el uso del péndulo.

57. **Péndulo.** — 1°. *Definiciones.* — Dícese á menudo que hay dos clases de *péndulos*, el *simple* y el *compuesto*. En realidad, la física sólo conoce uno, el *péndulo compuesto*. Todo cuerpo grave que es móvil, sea alrededor de un punto fijo llamado *centro de suspensión*, sea en torno de un eje fijo horizontal, llamado *eje de suspensión*, constituye un péndulo compuesto.

Según esta definición, el péndulo puede tener una forma cualquiera; habitualmente se le da la de una masa metálica, de superficie esférica ó lenticular, sostenida por una varilla rígida también metálica. Una plomada (fig. 13) es el ejemplo más sencillo de la primera disposición: el punto de amarre de la extremidad superior del hilo es el centro de suspensión. Los balancines de reloj de las figuras 21 y 54 representan los tipos de péndulos más usados. El eje de suspensión es ya la arista viva ó *cuchillo* de un prisma triangular de acero, engarzado en la varilla del péndulo perpendicularmente á su longitud (fig. 53), ya una lámina de acero, delgada y flexible, que sostiene la varilla del péndulo y que se encorva ligeramente en cada uno de sus movimientos (fig. 58). Cada vez que en física se habla de péndulos, trátase de uno de estos aparatos.

Cuanto al *péndulo simple* ó *péndulo ideal* no es un péndulo, sino una concepción teórica absolutamente irrealizable en la práctica, puesto que se la define : un *punto material pesado*, suspendido, mediante un hilo *inextensible* y *sin peso*, de un punto fijo alrededor del cual puede moverse libremente. Este concepto se utiliza en el estudio matemático del *movimiento pendular* ú *oscilatorio*.

2°. *Movimiento oscilatorio.* — Todo péndulo abandonado á sí mismo toma posición de equilibrio estable, lo mismo que la plomada : esta

posición es tal, que la vertical de su centro de gravedad encuentra al eje de suspensión.

Imaginemos que se corte el péndulo por un plano vertical que pase por su centro de gravedad G y perpendicular á su eje de suspensión, y tomemos esta sección como plano de la figura 45. El péndulo está representado por la figura plana OG y su eje de suspensión, que corta al plano en el punto O, se encuentra figurado por este punto. En la posición de equilibrio, la vertical del centro de gravedad G va á pasar por el punto O, y por consiguiente el peso P del péndulo, aplicado en G y dirigido según la vertical, es destruído por la resistencia del punto fijo: no hay componente horizontal que pueda arrastrar al péndulo en el sentido en que es móvil, quiere decir, perpendicularmente á la vertical OG. Tracemos en el plano, con un radio igual á OG, un arco de círculo $A'HA_1$: si apartamos al péndulo de su posición de equilibrio, su centro de gravedad se moverá sobre este arco de círculo, como un punto material pesado que estuviera obligado á cambiar de lugar en él.

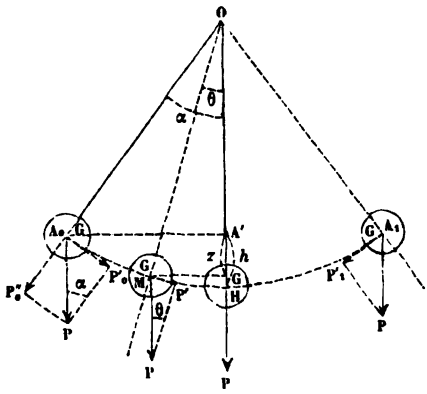


Fig. 45.

Llevemos el punto G á la posición A_0, de tal manera que la varilla del péndulo forme un ángulo α, igual á HOA_0, con su posición inicial. Como la dirección del peso P no pasa ya por el punto fijo, este peso puede descomponerse en dos fuerzas: una P''_0, dirigida por la prolongación de la varilla, y la otra P'_0, dirigida por la tangente al arco HA_0. La componente P''_0 queda anulada por la resistencia del punto fijo; pero la componente tangencial actúa para arrastrar al péndulo según el arco A_0H y para volverlo á su posición inicial de equilibrio.

Se ve, según el rectángulo de las fuerzas $A_0\ P'_0\ PP''_0$ (fig. 45) que esta componente P'_0 es igual á P sen. α: la fuerza aceleratriz es en consecuencia proporcional al seno del ángulo de separación y disminuye al mismo tiempo que este ángulo. Por ejemplo, en M, cuando la varilla del péndulo no forma con la posición inicial más que un ángulo θ, se ve, según el rectángulo de las fuerzas, que la componente tangencial se ha convertido en P' y sólo es ahora igual á P sen θ; esta componente es completamente anulada

cuando el péndulo ha alcanzado de nuevo su posición inicial OH.

Pero no se para ahí, pues ya no se encuentra en las condiciones iniciales. Al pasar de la posición OA_0 á la posición OH, *ha caído* de cierta altura *h*, que es igual á la variación de nivel A'H de su centro de gravedad. Así es que ha adquirido al caer cierta potencia viva, que está determinada por el teorema de las fuerzas vivas, y que es igual al trabajo motor de la gravedad durante el descenso, esto es á P*h*. De modo que el péndulo continuará su movimiento pasando de la vertical, arrastrado por esta velocidad adquirida.

Ahora bien, si se repite en un punto cualquiera del arco HA_1, la misma construcción que en el punto M, se observa que la componente tangencial P'_1 del peso está dirigida en sentido inverso del movimiento; la gravedad actúa pues como una fuerza retardatriz durante esta segunda fase del movimiento y sustrae poco á poco al péndulo la velocidad que le comunicara durante el descenso. Llegará, pues, un momento en que la fuerza viva adquirida será anulada enteramente por el trabajo resistente de la gravedad : entonces el péndulo cesará de subir, y volverá á caer inmediatamente hacia el punto H, que traspasará de nuevo, en virtud de su velocidad adquirida, y subirá otra vez hacia el punto A_0 hasta que su fuerza viva quede anulada. En el momento de esta nueva parada, el péndulo se encontrará en las mismas condiciones mecánicas que al principio, cuando se le separó por primera vez de su posición de equilibrio : habrá realizado así el primer período de su movimiento, y éste continuará del mismo modo, por espacio de una serie mayor ó menor de períodos análogos, que constituyen el *movimiento oscilatorio.*

Llámase *oscilación simple* al paso de una posición extrema del péndulo á otra posición extrema, á un lado y otro de la vertical. El *período* ú *oscilación completa* se compone de la sucesión de dos oscilaciones simples, de sentidos opuestos. El ángulo $HOA_0 = \alpha$ que mide el movimiento angular de cada punto del péndulo, se denomina *amplitud de la oscilación.*

Observación. — Si la gravedad fuera la única causa retardatriz del movimiento como es la única que lo acelera, el punto de parada A_1 sería exactamente simétrico del de partida A_0, como en el caso teórico del *péndulo simple.* En efecto, la fuerza viva que el péndulo ha adquirido al caer de la altura *h* no podría ser anonadada sino á consecuencia de una ascensión igual al descenso. Análogamente, el péndulo se elevaría hasta el punto A_0 en su movimiento de regreso, y el período oscilatorio estaría constituído por las dos oscilaciones simples, absolutamente idénticas. Por consiguiente, la amplitud permanecería invariable y el movimiento del péndulo duraría indefinidamente una vez comenzado. Sin embargo, no ocurre así porque dos causas extrañas á la gravedad concurren sin descanso á retardar el movimiento oscilatorio durante las fases de ascensión ; á saber : 1° la resistencia del aire ; 2° el rozamiento, más ó menos atenuado, pero siempre sensible, que se produce inevitablemente en el eje de suspensión.

58. **Leyes experimentales del péndulo.** — Las leyes del movimiento pendular propiamente dicho, descubiertas por medio del cálculo, no

pueden aplicarse rigurosamente al movimiento de un péndulo ordinario. Ha sido, pues, preciso estudiar directamente éste de manera experimental, y así se ha llegado á las leyes siguientes :

1°. Ley de la disminución de las amplitudes. — *La amplitud de las oscilaciones decrece en progresión geométrica cuando su número crece en progresión aritmética.*

Esta ley fué descubierta por Borda y comprobada después por Biot y otros muchos experimentadores. Las siguientes se deben á Galileo y son, por tanto, muy anteriores á la primera.

2°. Ley del isocronismo de las pequeñas oscilaciones. — Esta ley se puede enunciar de dos maneras :

I. *Las pequeñas oscilaciones de un péndulo son isócronas* [1], *tengan la amplitud que tuvieren;* ó bien :

II. *La duración de la oscilación de un péndulo es independiente de su amplitud, con tal que ésta sea pequeña.*

Ambos enunciados tienen la misma significación. Se ha visto que las amplitudes de un péndulo ordinario, que oscila en el aire, disminuyen con arreglo á la ley precedente. Las duraciones de oscilación del péndulo empiezan necesariamente para disminuir también, al mismo tiempo que estas amplitudes; pero á partir de cierto valor de la amplitud (unos 2° á 3°), la disminución en la duración deja de acompañar á la disminución en la amplitud : ésta sigue decreciendo, mientras la duración permanece constante. Esta duración de oscilación (para las amplitudes pequeñas) es pues un carácter específico de un péndulo determinado.

3°. Ley de las longitudes. — *La duración de las oscilaciones (de pequeña amplitud) de un péndulo es proporcional á la raíz cuadrada de la longitud del péndulo.*

En este enunciado, la expresión *longitud del péndulo* tiene el sentido particular y completamente experimental que le daba Galileo. Este físico operaba con péndulos análogos á los de la figura 46, constituídos sencillamente por una bola esférica pesada, suspendida de un hilo de peso insignificante : la longitud de cada péndulo era la dimensión total del hilo de suspensión aumentada con el radio de la bola. Más adelante se verá lo que conviene entender exactamente por *longitud del péndulo.*

4°. Ley de las sustancias. — *La duración de las oscilaciones (de escasa amplitud) de un péndulo, es independiente de la materia de que está hecho.*

Esto significa que péndulos de la misma longitud, constituídos por esferas de sustancias diferentes, tienen la misma duración de oscilación, á partir de la amplitud en que se obtiene el isocronismo.

Observación. — Esta ley no es más que la primera del descenso de los cuerpos en otra forma, á saber, que la gravedad ejerce acción análoga sobre todas las sustancias : de donde resulta que los cuerpos caen con la misma velocidad en el vacío.

1. Es decir, de análoga duración : ἴσος, igual y χρόνος, tiempo.

59. **Demostración experimental de las leyes del péndulo.** — Para demostrar estas leyes se usan péndulos compuestos que se parecen cuanto es posible á los que Galileo empleó en descubrirlas. Son esferas pequeñas, de sustancia muy densa como el plomo ó el platino, suspendidas de hilos muy flexibles y muy finos cuyo peso es despreciable (fig. 46). Según ya hemos dicho se toma como longitud de estos péndulos la distancia desde el centro de la esfera al punto de suspensión.

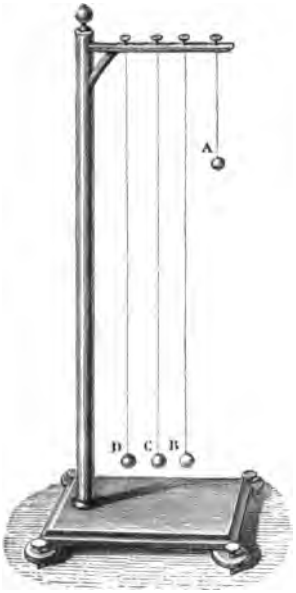


Fig. 46.

El método general de demostración es el siguiente: Se separa al péndulo de la vertical hasta que forme con ésta un ángulo determinado A que mide la amplitud inicial, y se cuenta la duración total de una serie de 100 oscilaciones simples con ayuda de un cronómetro que bate cuartos de segundo. Este instrumento se encuentra provisto de un botón que basta impulsar en un sentido ú otro para poner en movimiento la aguja ó para detenerla. Sea θ la duración total de la serie, y A′ el ángulo de separación final; tómase $\frac{\theta}{100}$ como duración de la oscilación y $\frac{A+A'}{2}$ como amplitud media.

Observación. — Para obtener el número de los periodos que corresponden á un intervalo dado de tiempo, no es necesario contar todos los pasos del péndulo por una misma posición en análogo sentido. Basta leer en el cronómetro seis pasos, pongamos por ejemplo, al empezar la experiencia y seis al fin. Las épocas de estos pasos dan á conocer, por sus diferencias, la duración media de la oscilación, así como el instante final y el inicial del experimento. Estos dos instantes limitan una duración que comprende un número entero de periodos. Dividiendo, pues, esta duración por la duración media aproximada del periodo y tomando el número entero N más inmediato al cociente obtenido, se tiene el número exacto de las oscilaciones efectuadas por el péndulo en un tiempo conocido θ. Por consiguiente, el cociente $\frac{\theta}{N}$ da á conocer la duración verdadera de una oscilación.

1°. *Ley de las amplitudes.* — Borda dió á su péndulo una amplitud inicial muy pequeña, que no pasaba de 1/3 de grado y que al cabo de 1800 oscilaciones se reducía á los 2/3 próximamente.

Biot confirmó la ley de Borda para amplitudes mucho mayores. Así, en uno de sus experimentos la amplitud inicial era superior á 1°; al cabo de 7000 oscilaciones se reducía á los 0,6 de su valor.

2°. *Ley del isocronismo.* — Cuéntanse sucesivamente varias series de 100 oscilaciones, á partir de un ángulo de separación dado. La amplitud media de estas oscilaciones disminuye poco á poco. Comparando las duraciones medias sucesivas $\frac{\theta}{100}$, $\frac{\theta_1}{100}$..., se observa que disminuyen al mismo tiempo que las ampli-

tudes medias $\frac{A + A'}{2}$, $\frac{A_1 + A'_1}{2}$..., — mientras éstas son grandes, — pero que alcanzan un valor constante desde que las amplitudes no pasan de 2 á 3 grados.

3°. *Ley de las longitudes.* — Se hacen oscilar péndulos cuyas longitudes son entre sí como los números 1,4 (fig. 46). Obsérvase que las duraciones de oscilación crecen como los números 1, 2...., es decir, como las raíces cuadradas de las longitudes.

4°. *Ley de las sustancias.* — Suspéndense de un mismo montante (fig. 46) varios péndulos, B, C, D, de la misma longitud constituidos por esferas de análogo diámetro pero de sustancias muy diferentes, por ejemplo, de platino, de hierro ó de vidrio hueco lleno de agua. Sepáranse estos tres péndulos un mismo ángulo de su posición vertical y se les suelta en el mismo instante : entonces se observa que sus oscilaciones son indefinidamente concordantes. Ó más sencillamente, se miden sus duraciones de oscilación (para una amplitud pequeña) y se observa que estas duraciones con casi iguales, no obstante la influencia perturbadora del aire.

60. Comparación del péndulo compuesto y del simple. — 1°. *Analogía de las leyes.* — No hay inconveniente en usar la expresión *péndulo simple*, cuando se le da el sentido preciso indicado precedentemente (57). Hasta diremos que es muy cómodo para enunciar de manera concreta las leyes del movimiento pendular propiamente dicho, es decir, del movimiento oscilatorio de un punto material pesado M, obligado á caer siguiendo un arco de círculo A_0 H A_1 (fig. 47), situado en un plano vertical y orientado simétricamente respecto de la vertical Oz del centro del círculo O. La longitud l del péndulo simple es el radio OH ú OA_0 del arco, y el centro O del círculo se convierte en centro de suspensión del péndulo simple ó en traza del eje de suspensión sobre el plano de la trayectoria.

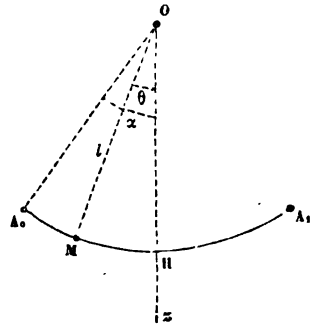


Fig. 47.

Ley del isocronismo. — En Mecánica racional se demuestra que la duración de la *oscilación simple* del péndulo simple está dada, en el caso de una amplitud finita cualquiera α, por la fórmula

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \operatorname{sen}^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right.$$
$$\left. + \left(\frac{1.3.5\dots 2n-1}{2.4.6\dots 2n}\right)^2 \operatorname{sen}^{2n} \frac{\alpha}{2} + \dots \right].$$

Si hacemos,

$$R = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + \dots + \left(\frac{1.3.5\dots 2n-1}{2.4.6\dots 2n}\right)^2 \operatorname{sen}^{2n} \frac{\alpha}{2} + \dots,$$

podremos escribir

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} (1 + R).$$

La duración de oscilación del péndulo simple, en el caso de una amplitud cualquiera, está pues expresada por la suma de dos términos, uno $\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, que es constante é independiente de la amplitud, y el otro que es una fracción del precedente, representada por una función de α. Luego, en realidad, para *el péndulo simple* lo mismo que para *el péndulo compuesto*, *la duración de oscilación depende de la amplitud* y disminuye al mismo tiempo que ésta.

Por otra parte, el término variable R es una fracción muy pequeña del término

constante. En efecto, se halla constituído por una serie muy convergente cuya suma tiende rápidamente hacia cero cuando la amplitud disminuye. Ejemplo, si se calcula R para $\alpha = 5^\circ$ y $l = 1$ m., se encuentra una fracción todo lo más igual á 0,0001 : para una amplitud inferior á 2°, el término R sería una fracción completamente despreciable. Se puede decir, en consecuencia, que para el *péndulo simple, la duración de las pequeñas oscilaciones no sólo es independiente de la amplitud*, sino que además, cuando se trata de amplitudes indefinidamente decrecientes, esta duración tiende hacia un valor límite, expresado por la fórmula.

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Ley de las longitudes. — Por otra parte, de esta última fórmula resulta que para el *péndulo simple* lo mismo que para el *compuesto*, la duración de las *pequeñas oscilaciones* es proporcional á la raíz cuadrada de la longitud del péndulo.

Ley de la disminución de las amplitudes. — Ley de las sustancias. — Admitiendo que el péndulo simple experimente por parte del medio en que oscila una resistencia proporcional á su velocidad, se encuentra por el cálculo que las *amplitudes* de las oscilaciones sucesivas (pequeñas amplitudes) se ajustan á la ley de Borda.

Sólo la experiencia puede resolver en lo relativo á la ley de las sustancias.

Identidad de las ecuaciones del movimiento. — ¿Esta analogía de las leyes de la duración de oscilación para las dos clases de péndulos se produce también en las ecuaciones de sus movimientos?

Así es efectivamente, y se demuestra que *el movimiento oscilatorio de un péndulo compuesto es idéntico al de un péndulo simple cuya longitud fuera igual á* $\frac{I}{Ma}$, llamando M la masa total del péndulo, I el *momento de inercia* del péndulo compuesto, y a la distancia de su centro de gravedad á su eje de suspensión [1].

61. **Fórmula del péndulo compuesto. — Longitud del péndulo compuesto, longitud del péndulo simple isócrono.** — Una de las ecuaciones del movimiento oscilatorio expresa la duración de una oscilación simple : llámasela en general *fórmula del péndulo*. Esta ecuación es, ya

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \operatorname{sen}^4 \frac{\alpha}{2} + \ldots \right]$$

para las oscilaciones de amplitud finita, ya

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

para las oscilaciones infinitamente pequeñas.

También se la formula de otro modo, cuando las oscilaciones, sin ser infinitamente pequeñas, tienen amplitud bastante escasa para que se puedan despreciar todas las potencias del seno superiores á la segunda y reemplazar el seno por el arco. Entonces resulta

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \frac{\alpha^2}{16} \right].$$

1. El momento de inercia de un cuerpo móvil alrededor de un eje, calculado con relación á este eje, no es más que la suma de los productos mr^2 de las masas m de cada uno de los elementos por el cuadrado de sus distancias r al eje, es decir que se tiene $I = \Sigma\, mr^2$.

En esta última forma la utilizó Borda para la determinación de g.

El coeficiente L tiene el valor $\frac{I}{Ma}$ en todas estas fórmulas.

Por analogía con la fórmula del péndulo simple se da al coeficiente L el nombre de *longitud del péndulo compuesto*. Se ve que esta longitud representa la de un péndulo simple que tuviera la misma duración de oscilación que el péndulo compuesto. Por esto se llama también á este coeficiente *longitud del péndulo simple isócrono ó síncrono*[1] *del péndulo compuesto.*

OBSERVACIÓN. — Es posible concebir fuera de todo cálculo la existencia necesaria del péndulo simple *isócrono* de un péndulo. En efecto, si los diversos puntos materiales que lo constituyen estuvieran aislados, describirían sus oscilaciones en tiempos tanto mayores cuanto más lejanos se hallan del punto de suspensión. Ahora bien, como todos estos puntos se encuentran invariablemente unidos entre sí, las duraciones de sus oscilaciones se reducen necesariamente á un valor medio común. Por consiguiente, el movimiento de los puntos más próximos al eje de suspensión se encuentra retardado, mientras se acelera el de los puntos más distantes. Entre estas dos posiciones extremas hay pues puntos que no son acelerados ni retrasados y que oscilan como si no estuvieran enlazados con el resto del sistema. Estos puntos equidistan del eje de suspensión y su conjunto forma una línea paralela á éste, que se llama *eje de oscilación*. Uno cualquiera de estos puntos materiales constituye evidentemente un péndulo simple *isócrono* del péndulo compuesto. Estos péndulos simples tienen todos igual longitud, que es la distancia del eje de suspensión al de oscilación : he ahí evidentemente la longitud del péndulo simple isócrono.

62. Quinta ley del péndulo. Ley de las intensidades. — 1°. *Enunciado.* — La fórmula del péndulo indica en el caso de las pequeñas oscilaciones una nueva ley que Galileo no advirtió. Puede enunciársela de dos maneras :

I. *La duración de oscilación es inversamente proporcional á la raíz cuadrada de la intensidad de la gravedad.*

En efecto, sean g' y g'' las intensidades de la gravedad en dos lugares diferentes donde se hace oscilar sucesivamente el mismo péndulo; según la fórmula, se tendrá para las duraciones T' y T'' de oscilación

$$T' = \pi\sqrt{\frac{L}{g'}} \qquad \text{y} \qquad T'' = \pi\sqrt{\frac{L}{g''}}.$$

Dividiendo estas dos igualdades miembro á miembro y simplificando, se obtiene

$$\frac{T'}{T''} = \frac{\sqrt{g''}}{\sqrt{g'}}.$$

1. De σύν, con, y χρόνος, tiempo; es decir, que tiene oscilaciones de análoga duración.

II. De esta ecuación se deduce

$$T' \sqrt{g'} = T'' \sqrt{g''} = \text{constante}.$$

Esta ecuación significa que *en un péndulo de longitud determinada el producto de la duración de oscilación por la raíz cuadrada de la intensidad de la gravedad es un número constante.*

2°. *Demostración experimental.* — Se utiliza un artificio experimental análogo al de la máquina de Atwood.

Hácese un péndulo compuesto con dos grandes masas de plomo, una A, de peso P y otra B, de peso $P + p$, fijas en las extremidades de un listón de madera, cuyo peso es despreciable. Perpendicularmente á la regla y en su centro O se encuentra un cuchillo de acero de arista horizontal, que sirve como eje de suspensión. De este modo se obtiene un péndulo compuesto, de longitud sensiblemente igual á OB (fig. 48), y de masa igual á $2M + m$, solicitado únicamente por el peso p, pues como la resultante de los dos pesos P pasa por el centro O, es constantemente anulada por la resistencia del montante que sirve para sostener el aparato. Por consiguiente, la aceleración disminuirá, como en la máquina de Atwood (46,1°), en la relación de

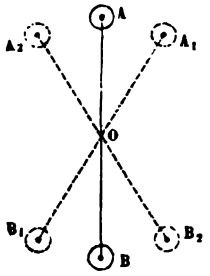


Fig. 48.

$$\frac{m}{2M + m} \quad \text{ó de} \quad \frac{p}{2P + p}.$$

Haciendo á P constante é igual á 1 kilogramo, pongamos por ejemplo, y dando á p sucesivamente los valores

$$\frac{2}{3}, \frac{2}{8}, \frac{2}{15} \text{ (de kilogramo)},$$

se tendrán para g los valores correspondientes

$$\frac{1}{4} g, \frac{1}{9} g, \frac{1}{16} g.$$

Contando las duraciones T' correspondientes á cada caso, se observará que son entre sí como los números 2, 3, 4.

63. **Longitud del péndulo simple isócrono : otra fórmula.** — Hemos visto que la longitud de un péndulo compuesto ó, lo que equivale á lo mismo, la de su péndulo simple isócrono, está dada por la fórmula.

$$L = \frac{I}{Ma}.$$

El momento de inercia I del péndulo, que entra en esta fórmula, se calcula con relación al eje de suspensión. Reemplazándolo por el momento de inercia J, calculado con relación á un eje paralelo al eje de suspensión y que pase por el centro de gravedad G del péndulo, se da á la fórmula precedente aspecto más cómodo para las aplicaciones.

Demuéstrase, en efecto, que entre I, J, M y a existe la relación

$$I = J + Ma^2$$

ó bien, adoptando para J la notación siguiente : $J = MK^2$ (siendo K una constante),

$$I = M(K^2 + a^2);$$

de donde se deduce

$$L = a + \frac{K^2}{a}.$$

Observaciones. — 1°. La constante K, definida por la ecuación $J = MK^2$, se llama el *radio de giro* del péndulo.

2°. Es posible darse cuenta del error cometido en la comprobación de las leyes experimentales del péndulo compuesto, cuando se toma como longitud de los péndulos esféricos la distancia del punto de suspensión al centro de la esfera. En efecto, sea d esta distancia y r el radio de la esfera. Calculando el radio de giro de una esfera con relación á uno de sus diámetros, se le encuentra igual á $\frac{2}{5}r^2$. Tiénese, pues, para la longitud verdadera del péndulo, es decir para la longitud del péndulo simple isócrono,

$$L = d + \frac{2}{5}\frac{r^2}{d}$$

(despreciando la masa del hilo que sostiene la bola). Ahora bien, en vez de esta longitud L, se toma otra $l = d$. El error cometido es pues $(L - l)$, quiere decir $\frac{2}{5}\frac{r^2}{d}$. Para $d = 1^m$ y $r = 25^{mm}$ este término correctivo es inferior á $1/4^{mm}$. No hay por consiguiente nada de sorprendente en que esta escasa diferencia no influya en la demostración de las leyes.

64. Teorema de Huygens : Reciprocidad del eje de oscilación y del de suspensión. — Péndulos reversibles. — 1°. *Definiciones.* — Sea XX' el eje de suspensión de un péndulo compuesto (fig. 49) : cuando el péndulo está en reposo, el plano vertical que pasa por XX' contiene el centro de gravedad G ; por tanto la vertical del punto G va á cortar al eje XX' en cierto punto O. La longitud OG es la distancia del centro de gravedad al eje de suspensión : á esto es á lo que hemos llamado a.

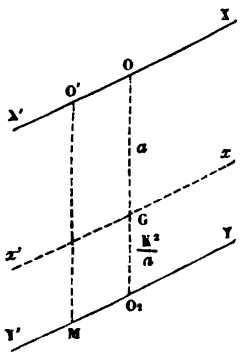


Fig. 49.

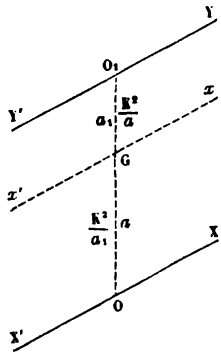


Fig. 50.

Si á partir del punto G tomamos una longitud GO_1 sobre la prolongación de OG, igual á $\frac{K^2}{a}$, la longitud OO_1 $\left(= a + \frac{K^2}{a}\right)$ es la longitud del péndulo compuesto. Un punto material situado en O_1, y enlazado con el punto fijo O por un hilo O_1O, inextensible y sin peso, constituiría un péndulo simple isócrono del compuesto. Los puntos O_1 y O, que son conjugados, se llaman á veces, el primero *centro de oscilación* y el segundo *centro de suspensión*.

Tracemos, por O_1 una recta YY' paralela al eje XX'. Si se une con el eje XX' por medio de una recta MO' paralela á O_1O un punto cualquiera M de aquella recta, los puntos conjugados M y O' se encuentran en las mismas condiciones que los puntos O_1 y O. En efecto, si se coloca en M un punto material, y se le enlaza con el punto fijo O' por un hilo inextensible y sin peso, se formará un péndulo simple, que tiene como longitud $MO' = O_1O = a + \frac{K^2}{a}$, que, por consiguiente, será isócrono del péndulo compuesto. Lo mismo ocurrirá con todos los

puntos del eje YY'. Tal es el motivo de que se llame á esta recta *eje de oscilación* del péndulo compuesto. Ya lo hemos definido antes (61).

Esta recta tiene una propiedad que descubrió Huygens :

2°. Teorema. — *El eje de oscilación de un péndulo compuesto es recíproco de su eje de suspensión.*

Esto quiere decir que si se suspende el péndulo por el eje YY', de modo que el eje de oscilación se convierta en eje de suspensión, entonces el eje de suspensión primitivo se convertirá recíprocamente en eje de oscilación (fig. 50); dicho de otra manera, el lugar de los péndulos simples isócronos del nuevo péndulo compuesto así constituído será precisamente el eje XX'.

Fig. 51.

Fig. 52.

3°. *Péndulos reversibles : Péndulos de Bohnenberger, de Kater, de Defforges.* — Esta curiosa propiedad ha sido utilizada para construir péndulos de dos cuchillas que pueden servir alternativamente de ejes de suspensión : llámaseles *péndulos reversibles.*

Hay tres tipos de ellos. En el primero, indicado por Bohnenberger (fig. 51) una de las cuchillas es fija ; la otra es móvil y permite hallar por tanteos la distancia en que los dos péndulos inversos son isócronos. En el segundo tipo las dos cuchillas son fijas, pero se puede hacer variar la distancia vertical del centro de gravedad del aparato, hasta obtener el sincronismo : tal es el péndulo de Kater.

Las dos cuchillas de acero, O y O_1 (fig. 52), están colocadas en una regla de latón OO_1, que constituye la varilla del péndulo ; la lentejuela es una pesada masa B. La distancia entre las dos cuchillas ha sido determinada de antemano por el constructor, de manera que la condición de reciprocidad se realice poco más ó menos. Obtiénesela completamente por medio de una carretilla móvil M*m* que se compone de dos piezas M y *m*, de pesos muy desiguales; la más pesada, M, puede fijarse sobre la varilla con ayuda de un tornillo de presión; la menos pesada *m*, se enlaza directamente con M por medio de un tornillo de aproximación. Gracias á esta disposición, se logran ya grandes cambios de lugar del centro de gravedad por el movimiento de la carretilla entera, ya cambios de lugar pequeños de G por el movimiento relativo de *m* respecto de M. Finalmente, el péndulo termina en sus dos extremos por dos largas agujas *t*, *t*, que facilitan la aplicación del método de las coincidencias (para la medida de T y de α).

Por último, en un tercer tipo empleado recientemente por el comandante Defforges (fig. 56) las dos cuchillas son *fijas y reversibles*, y la varilla perfectamente simétrica.

65. **Aplicación del péndulo al cálculo de** g. — El único método preciso para calcular la intensidad de la gravedad, se funda en el uso del péndulo; he aquí el principio :

Supongamos que se mide la duración T de las *pequeñas oscilaciones* de un péndulo. Esta duración se expresa por la fórmula-límite del péndulo, en función de los elementos del aparato y de la intensidad de la gravedad. Tiénese.

$$[1] \qquad T = \pi\sqrt{\frac{L}{g}}, \text{ de donde se deduce } g = \frac{\pi^2 L}{T^2}. \qquad [2]$$

Bastará, pues, con calcular L, longitud del péndulo simple isócrono del péndulo empleado. Si L se estima en metros y la duración T en segundos, el número g se referirá al metro y al segundo.

Este método lo imaginó é indicó Huygens; pero quien lo aplicó con éxito por la primera vez fué Borda. Vamos á exponer las experiencias de este físico que son clásicas. Después diremos algo sobre los antiguos trabajos de Kater, así como acerca de los recientes experimentos del comandante Defforges, efectuados con péndulos reversibles.

66. **Experiencias de Borda.** — 1°. *Método.* — Borda usó el método de Huygens, pero no la fórmula límite del péndulo. Utilizó esta otra

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16} \right),$$

que expresa con mucha exactitud la duración de una oscilación de escasísima amplitud, pero no *infinitamente pequeña.* Sus experimentos exigían, por consiguiente, varias medidas de precisión :

Medida de T, duración de una oscilación simple;

Medida de L, longitud del péndulo simple isócrono del péndulo empleado ;

Medida de α, amplitud de las oscilaciones cuya duración media.

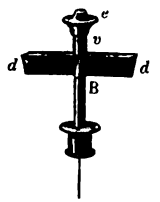


Fig. 53.

2°. *Descripción del péndulo de Borda.* — El aparato se compone de dos partes perfectamente distintas : el péndulo propiamente dicho, A, y la cuchilla de suspensión, B (fig. 53).

A. El péndulo propiamente dicho está formado por una pesada esfera de platino (de unos 36 milímetros y 1/2 de diámetro), sostenida por un alambre metálico muy delgado. (El alambre de Borda era de hierro; Biot lo reemplazó por otro de cobre, á fin de sustraerlo á la acción magnética de la tierra). El alambre se unía con la esfera mediante un casquete metálico muy delgado *cc*, que se adaptaba exactamente sobre la superficie esférica : el simple contacto de las dos superficies, previamente untadas con una delgada capa de sebo, basta para mantener la adherencia y de esta manera cuelga del hilo la masa del péndulo.

B. La otra extremidad del alambre está enlazada con una *cuchilla de suspensión* B, análoga á la de los relojes. Consiste en una pieza cilíndrica de metal, donde se engarza, perpendicularmente á su longitud, un prisma triangular de acero. El eje de suspensión es la arista horizontal *dd* del prisma, que descansa sobre dos planos fijos, bien pulimentados, de piedra muy dura ó de acero, y perfectamente horizontales. Estos planos engarzan á su vez en un gran platillo de hierro, sujeto de montantes muy bien clavados en una gruesa pared (fig. 54).

3°. *Medida de la duración de una oscilación. — Método de las coincidencias.* — Podría emplearse el método que antes hemos descrito (59) para la demostración de las leyes del péndulo. Borda usó otro sistema de cálculo, que es *el de las coincidencias*, ideado por Mairan.

Principio del método. — Dispónese el péndulo delante del balancín de un reloj de segundos (fig. 54), de tal manera que : 1°. durante la marcha de los dos péndulos, sus planos de oscilación sean paralelos ; — 2°. en estado de equilibrio las

verticales de sus centros de gravedad se encuentren en un mismo plano vertical perpendicular al plano de oscilación.

Supongamos reducidos los dos péndulos á estas dos verticales (fig.55). En estado de reposo, el péndulo P_0 se proyecta exactamente sobre el balancín B_0, para un

Fig. 54.

observador que mire hacia el azimut Oz. Lo mismo absolutamente ocurre cuando durante su movimiento los dos péndulos pasan en el mismo instante, sea en el mismo sentido, sea en sentidos contrarios, por el azimut Oz : dícese que se produce *una coincidencia* cuando los dos péndulos se superponen de esta manera, *andando en el mismo sentido.*

Supongamos que se observan sus movimientos simultáneos á partir del instante de una coincidencia, y que el péndulo P_0 ande un poco más de prisa que el balancín. Este describe primero el arco $B_0 A_1$, en el sentido indicado por la flecha, y después el arco $A_1 B_0$, en sentido contrario, y pasa por la vertical, al cabo de 1 segundo, con velocidad igual y opuesta á su velocidad de partida; después describe el arco $B_0 A_0$, vuelve de A_0 hacia B_0, y pasa otra vez por la vertical al cabo de 2 segundos, con la misma velocidad y en idéntico sentido que al principio. Durante el mismo tiempo, el péndulo P_0 habrá descrito también, dos veces en sentido contrario, el arco $P_0 a_1$, y después el arco $P_0 a_0$; pero *como va algo más de prisa* que el balancín, habrá pasado de nuevo por la vertical antes que éste y se encontrará en P_1 en el instante preciso en que el balancín esté en B_0: habrá ejecutado, pues, dos oscilaciones simples, *más* un arco $P_0 P_1$: este arco es proporcional al exceso de la velocidad del péndulo sobre la del balancín y mide el adelanto del primero sobre el segundo. Análogamente, al cabo de otros dos segundos, cuando el balancín pase de nuevo por su posición inicial, el péndulo no estará ni en P_0 ni en P_1, habrá llegado á P_2, á una distancia de la vertical $P_2 P_0$, que es igual á dos veces el adelanto $P_0 P_1$. Y así sucesivamente, entre dos pasos consecutivos del balancín por la vertical, el péndulo realizará dos oscilaciones simples, *más un adelanto constante*, que se agregará á los adelantos precedentes. La suma de estos adelantos sucesivos (que constituye la separación del péndulo en el momento del paso) crecerá pues proporcionalmente al tiempo y ya la coincidencia no podrá realizarse cuando la suma de los arcos $(P_0 P_1 + P_1 P_2 + \ldots)$ sea exactamente igual á $(P_0 a_1 + a_1 P_0 + P_0 a_0 + a_0 P_0)$, es decir, dos veces la amplitud total del péndulo. La condición necesaria y suficiente para que haya una primera coincidencia es pues

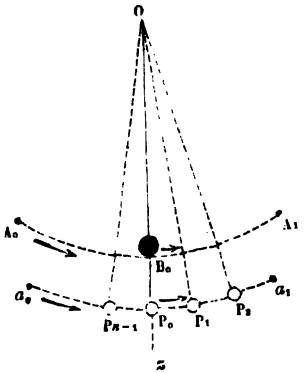


Fig. 55.

[1] $$\Sigma\,(\text{arc } P_0 P_1) = 2\,(\text{arc } a_0 a_1).$$

En el momento de esta coincidencia, el péndulo P habrá ejecutado necesariamente *dos oscilaciones simples más que el balancín*. La consecuencia de la coincidencia es que

[2] $$n = N + 2,$$

llamando N al número de los segundos marcados por el balancín en el intervalo de las dos coincidencias, y n al número correspondiente de las oscilaciones simples del péndulo. Las ecuaciones [1] y [2] resumen todo el método.

Observaciones. — I. Se ve que la coincidencia no será *matemáticamente* realizable sino en el caso de que el adelanto $P_0 P_1$ es exactamente una parte alícuota de la amplitud α; pero bastará para que se realice prácticamente que el adelanto sea muy pequeño respecto de la amplitud α, es decir, que haya muy escasa diferencia, según supusimos antes, entre las dos duraciones de oscilación.

II. Si el péndulo tuviera un retraso en vez de un adelanto sobre el balancín, no habría nada que modificar en los razonamientos precedentes, excepto el signo de $P_0 P_1$, y por tanto la fórmula final, que vendría á ser

$$n = N - 2.$$

C. *Operación.* — Las dos verticales se obtuvieron en la práctica, una por el alambre mismo de suspensión del péndulo, y la otra por un trazo negro vertical dibujado en una hoja de papel que se pegó simétricamente en la superficie del balancín (fig. 54). Las coincidencias se observaban con un anteojo inmóvil,

situado á 10 metros de distancia, y orientado de modo que el trazo vertical del balancín estuviera perfectamente oculto por el hilo del péndulo, en la posición de equilibrio. Por último, ambos aparatos se colocaban en una urna de cristales, para preservarlos de la agitación del aire exterior y de las variaciones de temperatura. Más adelante Biot puso al reloj dentro de otra urna de vidrio, interior á la primera, por haber observado que el movimiento del balancín ejercía influencia sobre el péndulo por medio del aire.

La operación es sumamente sencilla. Basta con soltar el péndulo en un momento que se marca en el reloj y esperar después tranquilamente la producción de dos coincidencias sucesivas. Sea N el número de segundos, marcado por el reloj, que transcurre entre los dos instantes; según la fórmula precedente se tiene $n = N \pm 2$, de donde se deduce, para la duración de una sola oscilación simple, $T = \frac{N}{n}$.

Observaciones. — I. Se comprende sin dificultad que el observador no necesita mirar por el anteojo durante todo el intervalo de tiempo que separa dos coincidencias. El conocimiento aproximado de la duración de oscilación del péndulo le permite prever la época de la coincidencia : basta con que observe un poco antes.

II. Si nos equivocamos en una oscilación en el instante de la coincidencia, sólo resulta pequeñísimo error. Es fácil convencerse de ello haciendo á N sucesivamente igual á 1000, y después á 1001 en la fórmula precedente ; de ahí se deducen para T los valores 0,998014 y 0,998016, que no se diferencian uno de otro sino en el sexto orden decimal. Este ejemplo numérico indica el grado de precisión del método.

4°. *Medida de las amplitudes de las oscilaciones.* — *Método.* — La operación precedente da como resultado, no lo que dura una oscilación particular, sino la *duración media* correspondiente á *n* oscilaciones consecutivas.

Si las oscilaciones fueran muy pequeñas, no habría que preocuparse de su amplitud, puesto que su duración sería independiente de ésta. Pero en realidad las amplitudes disminuyen de manera continua, con arreglo á la ley descubierta por Borda (58,1°). Sin embargo, cuando la experiencia dura muy poco, puede admitirse que las amplitudes sucesivas α_1, α_2, α_3 ..., α_n difieren poco cada una de ellas de la amplitud media obtenida tomando la semi suma de las amplitudes extremas $\frac{\alpha_n + \alpha_1}{2}$. Bastará, pues, llevar este valor de α á la fórmula, y entonces se tendrá

$$T + \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \frac{(\alpha_1 + \alpha_n)^2}{32}\right].$$

Operación. — Entonces la operación se reduce á medir dos amplitudes. No es absolutamente necesario escoger la primera y la última, según la fórmula indica; el decrecimiento de las amplitudes se efectúa por grados tan poco sensibles, que basta ampliamente con medir una de las primeras para α_1 y una de las últimas para α_n. Al efecto se coloca detrás del péndulo B (fig. 68) una escala horizontal dividida en partes iguales, á una distancia conocida del centro de suspensión. Entonces se observan sobre esta escala las posiciones extremas del péndulo en un momento dado, y se deduce de ahí por un cálculo muy sencillo el valor del ángulo α correspondiente á esta oscilación. — Lo que entra en las fórmulas precedentes es este *valor de ángulo* y no *la amplitud misma.*

5°. *Medida de la longitud del péndulo.* — Ya no falta más que medir la longitud del péndulo compuesto, esto es, la longitud del péndulo simple isócrono que representa el coeficiente L en la fórmula T.

Se ha visto que esta longitud L está enlazada con los elementos geométricos del péndulo por medio de la expresión

$$L = a + \frac{K^2}{a},$$

en la cual *a* representa la distancia del centro de gravedad del péndulo al eje de suspensión y K^2 su radio de giro, calculado respecto de un eje que pasa por el centro de gravedad.

Medida de a. — Si suponemos reducido el péndulo á la parte que hemos designado por B, es decir, á la esfera de platino, al casquete que le sirve de encaje y al alambre de suspensión, la medida de a es muy sencilla. Como el centro de gravedad del sistema coincide sensiblemente con el centro de la esfera, bastará determinar: primero la distancia vertical del eje de suspensión á la extremidad inferior del diámetro vertical de la esfera. Esta distancia d es igual á la longitud λ del alambre, aumentada con el diámetro $2r$ de la esfera. Se tiene

$$[1] \qquad d = \lambda + 2r;$$

y después la distancia del eje de suspensión á la extremidad superior del diámetro vertical de la esfera. Resulta evidentemente

$$[2] \qquad d = \lambda.$$

De estas dos expresiones resulta $d - d' = 2r$, es decir, el diámetro de la esfera y

$$d - \frac{d - d'}{2} = \lambda + r = a.$$

Estas dos medidas se efectuaron por medio de un pequeño instrumento de precisión que tenía por órgano principal lo que se llama un *tornillo micrométrico* (fig. 68). Lo describiremos más adelante (84) como aplicación de este tornillo.

Cálculo del momento de inercia. — Si seguimos suponiendo que el péndulo P se reduce á la parte B (esfera, casquete y alambre), su momento de inercia se compone del de la esfera aumentado con el del casquete y del alambre.

Sábese que K^2, cuadrado del radio de giro de una esfera de radio r, calculado con relación á uno cualquiera de sus diámetros, es igual á $\frac{2}{5} r^2$. Tiénese, pues, despreciando los radios de giro del alambre y del casquete,

$$MK^2 = M \frac{2}{5} r^2, \quad \text{de donde} \quad K^2 = \frac{2}{5} r^2.$$

Longitud del péndulo simple isócrono. — Reuniendo todas las medidas precedentes resulta

$$L = a + \frac{K^2}{a} = \lambda + r + \frac{\frac{2}{5} r^2}{\lambda + r}.$$

6°. *Comprobación de estas operaciones.* — I. En realidad el péndulo se compone, no sólo de la parte B, sino también de la A, que es la cuchilla de suspensión; pero Borda logró eliminar la influencia de esta última por medio de un método muy ingenioso. Moviendo una tuerca á lo largo de un tornillo vertical que se ve (fig. 53) por encima de B, regulaba la posición del centro de gravedad del cuchillo de manera que éste constituyera un péndulo, compuesto de la *misma duración de oscilación* que el péndulo completo. En estas condiciones, *el cuchillo no tiene influencia sobre el movimiento del péndulo completo:* ocurren las cosas como si éste se encontrara reducido á la parte B, es decir, á la esfera, el casquete y el alambre.

II. Borda demostró de manera experimental este hecho, efectuando sucesivamente la medida de n con dos cuchillos de pesos muy diferentes, pero dispuestos para oscilar solos, sincrónicos con el péndulo total; en ambos casos obtuvo números idénticos.

7°. *Causas de error en las experiencias de Borda.* — *Correcciones.* — Entre estas causas de error, unas son particulares é inherentes á los métodos mismos empleados por Borda, y otras generales, resultantes del uso mismo del péndulo.

Las últimas son con mucho las más importantes. Helas aquí: 1°. la influencia del aire: pérdida de peso del péndulo en marcha y obstáculo á su movimiento por resistencia y por viscosidad; 2°. influencia de los soportes, que sustraen también al péndulo parte de su fuerza viva por efecto de la vibración que las oscilaciones de éste les comunican.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF

Cuanto á las causas de error particulares, ya hemos señalado las más importantes : empleo de un alambre de suspensión magnético, influencia recíproca de los dos péndulos por medio del aire de la urna, dificultad de aprovechar el momento preciso de las coincidencias, etc.

MM. Célérier y Pierce plantearon en 1880 fórmulas de corrección muy prácticas, que tienen en cuenta la *impulsión del aire*, de *su arrastre* y de *su viscosidad*, así como de la *vibración de los pilares*. Pero la corrección más segura es la que consiste en prevenir los errores : así ha procedido recientemente el comandante Defforges, en una serie de experiencias ejecutadas en el servicio geográfico del ejército francés.

67. **Experiencias del comandante Defforges. — Péndulo de inversión y de cuchillas reversibles.** — Ya en 1849 se concibió la idea de un péndulo perfectamente simétrico y provisto de dos cuchillas *reversibles*, cuyas aristas sean ejes casi recíprocos. Un péndulo de esta clase permite eliminar varios errores : 1°. por la *reversión*, el error de la posición del centro de oscilación ; 2°. por la *simetría de su forma*, el efecto total del medio ambiente ; 3°. por el *cambio de cuchillas*, la influencia de la curvatura de sus aristas. Esta eliminación exige por lo demás *expresamente* que todas las oscilaciones se efectúen en los mismos límites de amplitud.

El comandante Defforges hizo construir por los Hermanos Brünner péndulos de ese género para sus experimentos. Están formados por un tubo hueco de latón (fig. 56) de 1 metro de longitud, de 30 milímetros de diámetro y de 3 milímetros de grueso, terminado en dos semi-esferas provistas cada una de una punta cilindro-cónica. El aparato completo comprende dos péndulos del mismo peso, que pueden oscilar sucesivamente alrededor de las mismas cuchillas y cuyas aristas distan 50 centímetros una de otra. Estos dos péndulos tienen longitudes iguales á 1 m. y 1m,42, y sus centros de gravedad están dispuestos análogamente, de tal manera que se tiene

$$\frac{a}{a_1} = \frac{a'}{a'_1}.$$

El empleo de estos dos péndulos así dispuestos ha permitido eliminar, mediante una combinación conveniente de su duración de oscilación teórica, las causas de error antes enumeradas, sin excluir el efecto de la sacudida de los soportes ó sostenes.

Fig. 56.

68. **Resultados de las diversas medidas de g en París.** — Los resultados de estas experiencias se presentan habitualmente con dos formas :

1°. En la forma directa de g, esto es, de la aceleración buscada.

2°. En la forma de cierta magnitud enlazada con el valor de g por una relación muy sencilla y que se llama *longitud del péndulo de segundos*. Es la longitud del péndulo simple isócrono de un péndulo compuesto que tuviera precisamente como duración de oscilación 1 *segundo;* esta magnitud se obtiene evidentemente haciendo en la fórmula del péndulo $T = 1^s$. Resulta

$$1 = \pi\sqrt{\frac{L_1}{g}}, \text{ de donde } \quad L_1 = \frac{g}{\pi^2}.$$

Como esta magnitud es proporcional á g, puede servir para representar á ésta.

Los experimentos llevados á cabo por Borda en el Observatorio de París (incompletamente corregidos del error debido al empuje del aire) han dado :

$$L_1 = 99^{cm},3827,$$
$$g = 980\ ,882.$$

Después de la corrección completa efectuada por Pierce, estos números han pasado á ser :

$$L_1 = 99,3912 \text{ cm.}$$
$$g = 980,9696,$$

á la altura media de 67 metros sobre el nivel del mar y en la latitud de París.

El comandante Defforges encontró en la Oficina internacional de pesas y medidas (longitud O. = 0, 131 grado ; lat. N. = 54, 26 gr.; altura = 70, 4 m.) (el grado es la centésima parte del cuadrante) :

$$L_1 = 99,3952 \text{ cm},$$
$$g = 980,991.$$

69. **Variaciones de g y de L en la superficie del globo.** — Estos números no pueden servir más que para la altura sobre el nivel del mar y la latitud en que han sido determinados. Los trabajos de diversos experimentadores han probado, en efecto, que el valor de g y, por consiguiente, el de L_1, varían según los diferentes lugares donde se les obtiene, y que son funciones de dos variables : la altura vertical sobre el nivel del mar y la distancia al ecuador, contada en el meridiano, ó sea la latitud.

Por lo demás, es fácil calcular mediante una fórmula general, sea la intensidad de la gravedad, sea la longitud del péndulo de segundos en un punto cuya altura z en metros y cuya latitud λ son conocidas. Tiénese

$$g = g_{45,0}\,(1 - 0,00259 \cos 2\lambda)\ (1 - 0,000\,000\,196z),$$
$$L_1 = L_{45,0}\,(1 - 0,00259 \cos 2\lambda)\ (1 - 0,000\,000\,196z).$$

Los números 980,63 y 99,357 cm representan los valores $g_{45,0}$ et $L_{45,0}$ en la latitud de 45° y al nivel del mar.

Observación. — Con arreglo á estas fórmulas, se calcula que el *peso absoluto* de 1 kilogramo aumenta próximamente 5 gramos cuando se pasa del ecuador al polo, y que la *longitud del péndulo de segundos* crece en las mismas condiciones unos 5 milímetros próximamente.

70. **Variaciones de g en lo interior del globo.** — La ley de variación deja de ser la misma cuando en vez de subir sobre la superficie del globo, se penetra en su masa. Por una parte, *admitiendo* la identidad de la atracción universal y de la gravedad, se encuentra *mediante el cálculo*, que la atracción terrestre *debe aumentar proporcionalmente á la distancia al centro;* de consiguiente, el número g, que mide esta atracción, debe *disminuir* á medida que se llega á mayores profundidades. Por otra parte, una experiencia efectuada por M. Airy, con el método del péndulo, ha probado que g *empieza por crecer* cuando se penetra en la tierra : así á la profundidad de 383 metros, el aumento es de $\frac{1}{1920}$ respecto del valor de la superficie.

Esta contradicción aparente entre la teoría y la observación se ha explicado mediante un cálculo de M. Roche. Admitiendo que la costra terrestre esté constituída por capas concéntricas homogéneas, pero de densidades crecientes, y que el aumento de densidad sea proporcional al cuadrado de la distancia al centro, M. Roche encuentra, efectivamente que :

1°. La gravedad debe aumentar en lo interior del globo hasta una profundidad igual á 1/6 del radio terrestre y que en este punto

$$g' = \frac{16}{15} g.$$

2°. La gravedad debe decrecer de manera continua á partir de esta profundidad. Á 1/3 del radio terrestre recobra su intensidad el mismo valor que en la superficie.

Como las minas más profundas no pasan de 1 kilómetro, los resultados de este cálculo no son susceptibles de comprobación directa. Hay que contentarse, pues, con los experimentos de M. Airy, cuyos resultados están por lo demás acordes con los cálculos de M. Roche.

71. **Origen de la gravedad ; es un caso particular de la atracción universal.** — La fuerza de la gravedad no es más que la atracción planetaria ejercida por la Tierra sobre los cuerpos de pequeñas dimensiones colocados en su superficie y sigue las mismas leyes que esta atracción. En efecto, si fuera así, la atracción terrestre sería la misma que si toda la masa de la Tierra — suponiéndola esférica y homogénea ó formada de capas concéntricas homogéneas — estuviera condensada en su centro. Llamando f á su acción total sobre un cuerpo de masa m, M á la masa total de la Tierra, R á su radio y z á la altura del cuerpo se tendría

$$[1] \qquad f = \varphi \cdot \frac{Mm}{(R+z)^2}$$

y como aceleración de esta fuerza

$$[2] \qquad \gamma = \frac{f}{m} = \varphi \frac{M}{(R+z)^2}.$$

Comparemos estas dos cantidades f y γ, que caracterizarían la atracción terrestre, con el peso P del cuerpo y con la aceleración g que caracterizan á la gravedad.

1°. *Dirección de ambas fuerzas.* — La fuerza f se dirige hacia el centro del esferoide terrestre. Pero ya hemos demostrado que la dirección de la gravedad, ó en otros términos, la *vertical*, pasa visiblemente por el centro de la Tierra, por ser normal á la superficie de las aguas tranquilas : luego la dirección de la atracción es la misma que la del peso.

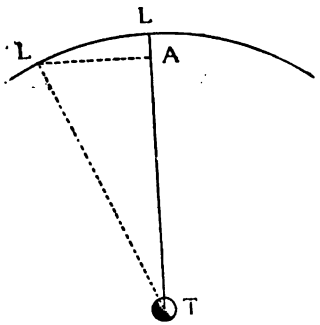


Fig. 57.

2°. *Intensidad de ambas fuerzas.* — La intensidad de la *atracción terrestre* está representada, como para la gravedad, por la aceleración del movimiento que imprime á los cuerpos atraídos. Obsérvase primero que esta aceleración, dada por la fórmula [2], es independiente de la masa m del cuerpo atraído. Pero hemos demostrado que lo mismo ocurre para la aceleración de la gravedad, puesto que *todos los cuerpos caen en el vacío con la misma rapidez.*

La fórmula [2] prueba además que la intensidad de la atracción terrestre varía en razón inversa del cuadrado de la distancia del cuerpo atraído al centro de la tierra. Ahora bien, las alturas de que disponemos en la superficie del globo son demasiado pequeñas, relativamente al radio terrestre, para que haya sido posible comprobar directamente, aun por el excelente método del péndulo, si la intensidad de la gravedad, esto es g, varía con arreglo á la misma ley. Pero si, según hizo Newton, se considera la revolución mensual de la Luna alrededor de la Tierra como el movimiento de un cuerpo grave que cae en dirección de nuestro planeta por efecto de la gravedad, será posible efectuar dicha comprobación.

Si L es la posición de la Luna en su órbita al llegar al tiempo t (fig. 57) y L'

su posición en el momento t', se puede admitir que el satélite ha caído en dirección de la Tierra desde la altura LA durante el intervalo de tiempo $(t' - t)$. La aceleración γ de este descenso es precisamente el valor que adquiere la intensidad g de la gravedad á la distancia en que se encuentra la Luna. Si la ley de la atracción se aplica á la gravedad, se ha de tener

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{R^2}{(R+z)^2}.$$

Aquí $R + z$ es igual á la distancia de los centros de la Luna y de la Tierra, quiere decir, á 60 radios terrestres. Resulta pues

$$\left(\frac{R}{R+z}\right)^2 = \left(\frac{1}{60}\right)^2 = \frac{1}{3600},$$

y por consiguiente

$$\gamma = \frac{1}{3600} g = \frac{9^m,8}{3600} = 0^m,00272.$$

Pero es posible calcular directamente γ en función de los elementos del movimiento de la Luna en su órbita. En efecto, si suponemos, según hizo Newton, que este movimiento es circular y uniforme, la aceleración γ no es más que la *aceleración centrípeta* definida por la fórmula $\frac{V^2}{\rho}$, siendo V la velocidad del movimiento circular y ρ el radio de la órbita. Ahora bien, de una parte ρ es igual á la distancia de la Luna á la Tierra, quiere decir á 60 R ó $60 \times 6\,360\,000$ metros. Por otra parte, es posible calcular fácilmente V dividiendo la circunferencia que describe el centro de la Luna por el tiempo que dura una revolución : tiénese

$$V = \frac{2\pi\rho}{T} = \frac{2\pi . 6\,360\,000^m \times 60}{27^d\ 7^h\ 43^m\ 4^s}.$$

Convirtiendo á T en segundos, se obtiene próximamente $V = 1020$ metros. Resulta por fin

$$\gamma = \frac{1020^2}{60 \times 6\,360\,000} = 0,00272.$$

Obsérvase que se encuentra como valor de γ el mismo número que precedentemente, hasta la quinta decimal. La gravedad sigue, pues, la misma ley de variación con la distancia que la atracción terrestre : de donde resulta que estas dos fuerzas son idénticas en intensidad como en dirección, y, por consiguiente, que la gravedad no es más que la *atracción planetaria* de la Tierra, esto es, un caso particular de la *atracción universal*.

72. **Diversas aplicaciones del péndulo compuesto.** — Entre las principales aplicaciones del péndulo, citaremos :

La regularización de los relojes, por Huygens;

La medida de la intensidad de una fuerza cualquiera, en magnitud y en dirección.

1°. *Regularización de los relojes.* — Huygens fué quien tuvo por primera vez la idea de aplicar el isocronismo de las pequeñas oscilaciones del péndulo á la regularización del movimiento de los relojes [1].

La varilla del péndulo regulador (fig. 58) pasa por una horquilla

1. En 1657; algunos años después, en 1665, aplicó el *muelle espiral* á la regularización de los relojes de bolsillo.

a destinada á transmitir el movimiento á otra varilla *b*, la cual está enlazada con un eje horizontal O. Fija á este eje se encuentra una pieza *mn*, llamada *escape de áncora* por causa de su forma y que termina en sus extremidades formando dos paletas que se encuentran alternativamente en contacto con los dientes de una rueda R, nombrada *rueda de encuentro*, ó también *rueda de escape* y *rueda de punzón*. Esta rueda, solicitada por el mecanismo que hace andar el reloj, tiende á adquirir movimiento de rotación continuo en el sentido indicado por la flecha. Si el péndulo está en reposo, la rueda es detenida por la paleta *m*, y con ella todo el mecanismo. Por el contrario, si el péndulo oscila y toma la posición indicada por la línea de puntos, el diente que tocaba contra la paleta *se escapa*, y la rueda gira, pero sólo medio diente, porque como el arco *mn* se inclina en sentido contrario, la paleta *n* va á detener un diente á su vez. Luego, en la oscilación siguiente, este diente se escapa, y entonces la paleta *m* es la que para el diente que sigue al que paró primero, y así sucesivamente, de modo que á cada oscilación doble del péndulo, la rueda de encuentro adelanta un diente. Ahora bien, las oscilaciones de este aparato tienen escasa amplitud y son isócronas : por consiguiente, la rueda de encuentro y el mecanismo del reloj, que es solidario de ella, andan y se paran en intervalos iguales, marcando divisiones iguales del tiempo.

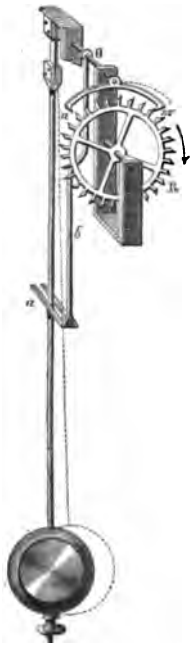


Fig. 58.

2ª. *Medida de la intensidad de las fuerzas constantes.* — Imaginemos un cuerpo móvil en torno de un eje, pero que se sustrae á la acción de la gravedad : tal sería un grave obligado á girar alrededor de un *eje vertical*. Supongamos que se someta este cuerpo á la acción de un sistema de fuerzas paralelas (F, F', F''), de magnitud constante, perpendiculares todas al eje de rotación. Respecto de estas fuerzas, el péndulo se encuentra en la misma situación que un péndulo compuesto respecto de las fuerzas de la gravedad ; en una palabra, el cuerpo es un *péndulo compuesto* respecto del sistema de fuerzas paralelas. El sistema (F, F', F'' ...) tiene una resultante R igual á la suma (F + F'...) y aplicada en el centro de las fuerzas paralelas ; si el cuerpo está orientado de modo que la resultante R vaya á encontrar el eje, *permanecerá en equilibrio ;* si el cuerpo se aparta de esta posición, tomará inmediatamente un movimiento pendular, idéntico al del péndulo compuesto, y representado por las mismas ecuaciones. La duración de las pequeñas oscilaciones estará dada por la misma fórmula-límite

$$T = \pi \sqrt{\frac{I}{M\gamma a}},$$

en la cual I representa el momento de inercia del cuerpo (calculado relativa-

mente al eje de rotación; M la masa total del cuerpo, γ la aceleración debida á la fuerza constante y a la distancia de su punto de aplicación (centro de las fuerzas paralelas) al eje de rotación. Haciendo $M\gamma = R$ se tiene

$$T = \pi \sqrt{\frac{I}{Ra}}.$$

Esta es la fórmula general del método de las oscilaciones. Mediante ella se puede determinar la intensidad R de una fuerza constante, en magnitud y dirección, haciendo oscilar, bajo la acción de esta fuerza, un péndulo compuesto *no grave* (es decir que esté libre de la acción de la gravedad), y cuyo eje de suspensión es perpendicular á la dirección de la fuerza constante.

Observación. — Si la fuerza constante no fuera perpendicular al eje de suspensión, sería posible descomponerla en otras dos fuerzas R' y R'', una perpendicular al eje, y la otra paralela á éste : como esta última no ejerce acción ninguna sobre el movimiento oscilatorio, lo único que entraría en la fórmula precedente es la intensidad R' de la otra componente. Se tendría

$$T = \pi \sqrt{\frac{I}{R'a}} \quad \text{y} \quad R' = R \operatorname{sen} \beta,$$

siendo β el ángulo de la dirección de la fuerza constante con la dirección del eje de rotación.

CAPÍTULO IV

MEDIDA DE LAS MAGNITUDES MECÁNICAS Y FÍSICAS. — SISTEMA DE LAS UNIDADES ABSOLUTAS Ó SISTEMA C. G. S. — INSTRUMENTOS DE PRECISIÓN.

73. **Definiciones generales.** — 1°. *Unidades de medida, valor numérico.* — *Medir una magnitud* es compararla con otra de la misma especie, llamada *unidad de medida*, ó sencillamente *unidad*. El resultado de esta operación se denomina el *valor numérico* ó sencillamente el *valor* de la magnitud medida : es un *número abstracto*, que expresa cuántas veces contiene esta magnitud á la unidad ó una parte alícuota de ella.

2°. *Relación entre el valor numérico y la unidad.* — Sea A una cantidad concreta (longitud, superficie, volumen ó peso), y sea a la unidad de medida adoptada (metro, área, litro ó gramo : el valor n de A será, por definición, el cociente $\frac{A}{a}$. Se tiene pues

$$n = \frac{A}{a}.$$

De esta fórmula resulta que el valor de una magnitud varía *en razón directa de ella*, y *en razón inversa* de la unidad de medida. Así, la distancia de París á Vierzon (por camino de hierro) medida en kilómetros, tiene por valor el número 200; la distancia de París á Limoges, que es exactamente doble de la anterior, tiene por valor el número 400. Pues si se calcularan estas dos distancias valiéndose de la legua francesa (unidad itineraria *cuádruple* del kilómetro) sus valores numéricos estarían representados por 50 y por 100, números *cuatro veces menores*.

3°. *Unidades arbitrarias. — Sistema de las medidas racionales : unidades fundamentales y unidades derivadas.* — En la elección de las unidades de medida se puede no tener cuenta ninguna de las relaciones físicas que existen, ó de las relaciones matemáticas que es posible establecer entre las diversas magnitudes que se miden. Entonces se tiene un conjunto de unidades de medida completamente independientes unas de otras : son *unidades arbitrarias.* Su uso duró en Francia hasta 1795 y sigue subsistiendo en la mayor parte de los restantes países.

Puédese por el contrario sacar partido de esas relaciones, naturales ó geométricas, entre las magnitudes de especies diferentes, para expresar todas las unidades de medida en función de un pequeño número de ellas convenientemente elegidas. Estas son las únicas arbitrarias, y reciben el nombre de *unidades fundamentales;* las demás se deducen de ellas, por medio de *definiciones* ó *relaciones* tan sencillas como sea posible y se denominan *unidades derivadas.* Su conjunto constituye un sistema que puede denominarse *de medidas racionales.* Tal es el *sistema de pesas y medidas métricas* ó *sistema métrico* establecido en Francia por la Convención nacional en 1795 [1]. Tal es también el *sistema de las medidas absolutas* ó *sistema de las unidades* C. G. S., introducido en las ciencias físicas el año 1881, por el Congreso internacional de electricistas.

74. **Ventajas generales de un sistema de medidas racionales.** — Basta comparar las unidades métricas con las antiguas unidades francesas ó bien con las unidades actuales de otros países para poner de manifiesto la superioridad de las medidas racionales sobre las arbitrarias. En el sistema métrico, que sólo se refiere á las medidas de extensiones y de fuerzas, la única unidad fundamental es el *metro.* Las demás unidades son *derivadas.* Sus valores y hasta sus nombres se deducen del metro, sea por definiciones geométricas (metro cuadrado, metro cúbico), sea por definiciones arbitrarias pero muy sencillas (gramo). De modo que el sistema métrico ha reemplazado por dos palabras nuevas y algunas compuestas la terminología prolija, confusa é incoherente de las antiguas medidas francesas (toesa, braza, pie, fanega, celemín, libra, grano, etc.), así como de las medidas extranjeras (pulgada, vara, milla, acre, pinta, grano, libra, etc.). Es un perfeccionamiento comparable al que resultó para la aritmética de la numeración decimal y para la química moderna de la nomenclatura ideada por Lavoisier.

Además, la reducción de las unidades de medida á fracciones de unidad y la reducción inversa, — que son operaciones bastante complicadas cuando se trata de medidas arbitrarias, — conviértense por el contrario en muy sencillas mediante las unidades métricas.

Finalmente, gracias á una elección conveniente de *unidades deri-*

1. Ley del 18 Germinal año III.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

vadas se pueden introducir en las fórmulas principales de la ciencia las mismas simplificaciones que en los cálculos.

75. — **Insuficiencia del sistema métrico. Necesidad de un sistema de medidas absolutas: sistema de Gauss y sistema C. G. S.** — El sistema métrico no contiene más que unidades de extensión y de peso: es, pues, insuficiente para valorar todas las magnitudes que se consideran en mecánica y en física. Presenta además otro inconveniente más grave todavía y es el de no haber sido adoptado universalmente por todas las naciones extranjeras. Así es que los hombres de ciencia no franceses usan en sus trabajos unidades de medida diferentes de las métricas y distintas entre sí.

De esta multiplicidad de medidas ha resultado que las mismas fórmulas han ido escritas en diversos países con varios coeficientes, y que resultados de experiencias idénticas se han expresado con números muy distintos. Para citar un sencillo ejemplo de esto, el mismo valor de g que en Francia representan por el número 9, 80, (unidades métricas) era expresado en Inglaterra por la cifra 32, 2 (pie inglés y segundo). En consecuencia, la lectura de las memorias científicas, ya tan difícil por el hecho de estar escritas en lenguas extrañas, se ha complicado de manera deplorable por el uso de estas unidades diferentes y la necesidad de reducir todos los resultados numéricos á una escala común.

Gauss fué quien primero propuso el establecimiento de un sistema de medidas racionales que, á falta de idioma científico universal, se convirtiera en un sistema de medidas universal y suprimiera todos los inconvenientes de los sistemas arbitrarios ó nacionales.

La *Asociación británica para el adelanto de las ciencias* hizo suya esta idea, y propuso desde 1852 un *sistema de unidades absolutas* poco diferente del de dicho sabio, que la Sociedad Real de Londres adoptó en 1865. Este es el mismo que fué discutido y precisado en 1881 por el Congreso de los Electricistas, y consagrado definitivamente con el nombre de *Sistema de las unidades absolutas* ó *Sistema* C. G. S. Este último calificativo es una abreviatura de las palabras *Centímetro-Gramo-Segundo*, las tres unidades fundamentales[1].

76. **Exposición del sistema C. G. S.** — Llámase *sistema C. G. S.* al conjunto de las unidades de medida racionales, llamadas *unidades absolutas* ó *unidades C. G. S.* Puede dividirselas en tres categorías: las *unidades fundamentales*, las *unidades derivadas* y las *unidades secundarias*.

I. Unidades fundamentales. — Estas son las unidades de medida arbitrarias é independientes de que se pueden derivar todas las demás y que representan, en consecuencia, las *bases* del sistema entero. Tres bastan para expresarlas todas, á saber:

Una longitud definida, el *centímetro*
Una masa definida, la *masa del gramo;*
Un intervalo de tiempo definido, el *segundo*[2].

1. Conviene adoptar este sistema de medidas no obstante la imperfección de que adolece en muchos puntos. En adelante indicaremos los valores de todas las constantes de la física, primero en unidades vulgares del sistema métrico y después en unidades absolutas del sistema C. G. S.

2. Esta elección particular es asunto de conveniencia más bien que de necesidad; pues en

Con las tres iniciales C. G. S. de estas tres unidades se ha constituido el símbolo característico del sistema.

1°. *Unidad de longitud C. G. S.: centímetro.* — El centímetro se define *teóricamente* diciendo que es la centésima parte del *metro teórico*, es decir, de la diezmillonésima parte del cuarto de meridiano terrestre. Pero como existe una pequeña diferencia entre el metro teórico y la regla depositada en los Archivos franceses con el nombre de *metro-tipo*, lo que se ha tomado como unidad de longitud en el sistema C. G. S. es la *centésima parte* de *este metro-tipo*.

2°. *Unidad de masa C. G. S.: gramo-masa.* — Un *peso definido* no podía servir de unidad fundamental de fuerza en un sistema de medidas internacional, porque según hemos visto precedentemente, el peso de una masa determinada varía con la latitud. Este inconveniente, señalado por Gauss, lo condujo á tomar como unidad fundamental una *masa definida*, que es una magnitud *absoluta*, quiere decir invariable, independiente de la latitud : y eligió la *masa del gramo*. Esta misma unidad es la que se ha adoptado en el sistema C. G. S. Los ingleses la llaman sencillamente *gramo;* pero en Francia tienen que darle el nombre de *masa del gramo* ó *gramo-masa*[1].

El *gramo-masa* se define teóricamente : la *milésima parte* de la masa del *kilogramo teórico*, siendo éste á su vez el peso de un decímetro cúbico de agua pura á 4°, pesado en el vacío en París. Pero el lingote de platino que ha sido fundido para realizar el kilogramo teórico (y que está depositado en los Archivos franceses con el nombre de *kilogramo-tipo*) tiene masa algo inferior á la teórica[2]. : es pues la *milésima parte de la masa del kilogramo-tipo* lo que se ha tomado como unidad de masa C. G. S.

3°. *Unidad de tiempo C. G. S. : segundo.* — Se adoptó la unidad de tiempo más generalmente usada hasta entonces, es decir, el *segundo* de tiempo medio. Defínese así el *segundo :* la ochenta y seis mil cuatrocentésima parte ($\frac{1}{86400}$) del *día solar medio*.

II. Unidades derivadas. — Todas las magnitudes mecánicas y físicas pueden medirse por medio de unidades *derivadas* de las precedentes.

1°. *Unidad de superficie C. G. S.: centímetro cuadrado.* — Este es el cuadrado que tiene por lado la unidad de longitud C. G. S, es decir, *el cuadrado de* 1 *centímetro de lado*.

2°. *Unidad de volumen C. G. S. : centímetro cúbico.* — Es *el cubo que tiene como lado* 1 *centímetro*[3].

3°. *Unidad de velocidad C. G. S.* — Es *la velocidad de un móvil, animado de movimiento uniforme, que recorre* 1 *centímetro en* 1 *segundo* (es decir, la unidad de longitud en la unidad de tiempo).

La unidad de velocidad no ha recibido nombre particular : llámasela sencillamente *unidad de velocidad C. G. S.*

4°. *Unidad de aceleración C. G. S.* — Es *un aumento de velocidad de un centímetro*

teoría bastan tres unidades independientes para fundamento de todo el sistema. Así se habría podido tomar, pongamos por ejemplo :

Una masa definida,
Una cantidad de energía definida,
Una densidad definida.

1. Esta obligación es un argumento grave contra la elección de la palabra *gramo*. En efecto como esta palabra tenía ya en Francia un sentido preciso y usual, es imposible adoptarla sin modificación. Ha habido, pues, que decir en términos poco elegantes *gramo-masa*, reservando la frase *gramo-peso*, que es un pleonasmo, para designar la unidad de peso del sistema métrico. Tal inconveniente no se presenta en el idioma inglés, puesto que la voz *gramo* no existía en él.

2. Según trabajos recientes, 1 centímetro de agua pura á 4° tiene como masa 1,0000013 (C. G. S.). Su masa es igual á la unidad C. G. S. únicamente á la temperatura 2°,85 ó á la de 5°,15.

3. Gracias á la elección del centímetro como unidad C. G. S. ocurre que la *densidad* C. G. S. del agua pura (es decir, la masa del centímetro cúbico) es igual á la *unidad*, mientras que en el sistema métrico, donde la unidad de volumen es el decímetro cúbico, esta densidad es igual á 1 000 000. Por esto se adoptaron el centímetro y el gramo, más bien que el metro y el gramo.

por segundo (quiere decir, la unidad de velocidad C. G. S.), en un movimiento uniformemente acelerado.

Así la aceleración de la gravedad en París, que está representada por el número 9,8096 en unidades métricas, es igual á 980,96 en unidades de aceleración C. G. S. Las fórmulas que expresan la aceleración y la longitud del péndulo de segundos, en la latitud λ y á la altura z sobre el nivel del mar, han sido indicadas precedentemente en el sistema C. G. S.

5°. *Unidad de fuerza C. G. S : dina.* — Esta es *la fuerza* (constante en magnitud y en dirección) *que, actuando sobre la unidad de masa C. G. S. le imprime la unidad de aceleración C. G. S.* Esta unidad de fuerza C. G. S. ha recibido el nombre particular de *dina* [1].

En París el *gramo-peso* imprime á la unidad de masa C. G. S. (es decir á su propia masa) una aceleración igual á 980,96; luego, en virtud del principio de la proporcionalidad de las fuerzas á las aceleraciones, se tiene

$$\frac{1 \text{ (gramo-peso)}}{1 \text{ (dina)}} = \frac{980{,}96}{1} = 980{,}96.$$

El gramo-peso vale pues 980,96 dinas.

Por consiguiente, la dina vale, en unidades métricas, $\frac{1}{980{,}96}$ de gramo-peso, ó sea 1 *miligramo-peso* próximamente.

El valor del gramo-peso varía con la latitud, mientras que la dina tiene valor constante. Así, el gramo-peso vale $980^{d},61$ en la latitud $45°$, y $978^{d},10$ bajo el ecuador.

6°. *Unidad de trabajo C. G. S. : erg.* — Es *el trabajo efectuado por una dina que transporta un centímetro su punto de aplicación en su propia dirección.* Se le ha dado el nombre particular de *erg* [2].

Como la fuerza de 1 kilogramo-peso vale 1000 gramos-peso, es decir 980 960 dinas, y como 1 metro vale 100 centímetros, el producto de estos dos números, que representa 1 kilógrametro, es igual á $980\,960 \times 100$ ergs. Por consiguiente, un erg vale $\frac{1^{kgm}}{98\,096\,000}$, ó sea próximamente *un cienmillonésimo* de kilográmetro.

Observación. — La unidad de trabajo es al mismo tiempo la *unidad de energía*, sea que se la considere en estado potencial ó en el cinético (principio de la equivalencia del trabajo y de la enérgia).

La unidad de potencia C. G. S. es la *potencia de un motor que suministra un erg por segundo.* Esta unidad no ha recibido nombre particular : llámasela sencillamente *unidad de potencia C. G. S.*

Esta unidad es de extremada pequeñez relativamente á la unidad métrica. En efecto, 1 kilográmetro vale 98 096 000 ergs; por consiguiente 1 caballo de vapor vale $75 \times 98\,096\,000$ ergs, ó sean 7 357 200 000 ergs; de consiguiente, un motor que suministra 75 kilográmetros por segundo da en ese tiempo 7 357 200 000 ergs; tiene, pues, una potencia de 7 357 200 000 unidades C. G. S. Inversamente, la unidad de potencia C. G. S. es igual á

$$\frac{1 \text{ (caballo de vapor)}}{7\,357\,200\,000}$$

ó sea próximamente un *siete mil millonésimo* de caballo-vapor [3].

III. Inconveniente práctico de los sistemas de unidades absolutas : unidades secundarias. — El uso de estas unidades conduce á menudo en la práctica á números extremadamente grandes ó extremadamente pequeños, tan molestos de escribir como de enunciar.

El sistema métrico no estaba exento de este defecto. El metro, que es de cómodo empleo para medir las longitudes usuales, como la estatura de un hombre, el ancho de una plaza, la altura de un edificio, deja de convenir á las magnitudes astronómicas y á las microscópicas. Así fué que los fundadores del sistema métrico remediaron este inconveniente por la creación de múltiplos y submúlti-

1. De δύναμις, potencia, fuerza.

2. De ἔργον, trabajo.

3. Calculada con esta unidad, la potencia de una *mosca* valdría varias unidades, la de un hombre más de *mil millones* y la de un caballo de tiro cerca de *dos mil millones y medio*.

plos de la unidad fundamental y de unidades derivadas, el kilómetro y el miriámetro, el hectógramo y el kilogramo, etc., que son *unidades secundarias*.

Los fundadores del sistema C. G. S. han copiado del métrico el uso de las unidades secundarias, así como la regla para formarlas : sólo han añadido á los prefijos otras dos partículas nuevas : *mega* (de μέγας, grande), que quiere decir un millón, y *micro* (de μικρός, pequeño), un millonésimo. Así un *megerg* significa una unidad secundaria de energía que vale un millón de ergs (próximamente un centésimo de kilográmetro) y el *micrómetro* ó *micrón*, una unidad secundaria que vale *un millonésimo de metro* [1].

Observación. — *Notación del sistema C. G. S.* — La comisión de las unidades C. G. S. previó también el caso de que, no obstante el empleo de unidades secundarias, se llegara á números demasiado grandes ó demasiado pequeños y ha indicado un medio simple y cómodo de escribirlos. Pónese cada número en forma de un producto de dos factores, uno de los cuales es una potencia de 10 elegida de tal manera que el otro factor sea inferior á 10. En general se tendrá $N = K.10^n$. Se escribirá, por ejemplo, que

1 kilográmetro vale $0^{erg},98096 \times 10^8$,
1 caballo de vapor $0,73572 \times 10^{10}$ *unidades de potencia C. G. S.*

Esta notación es ventajosa para los cálculos logarítmicos, pues el exponente de la potencia de 10 es precisamente igual á la característica, positiva ó negativa, del logaritmo del número N.

77. **Conversión de las medidas racionales en medidas absolutas : dimensiones y ecuaciones de dimensiones.** — Dada una magnitud expresada en unidades racionales cualesquiera, métricas ó extranjeras, se puede necesitar convertirlas en unidades C. G. S. Este cálculo se efectuará fácilmente, si se conoce la *ecuación de las dimensiones* de las unidades derivadas que se han empleado.

Se ha convenido en decir que toda unidad derivada *que es del 2º grado* respecto de la unidad fundamental, es decir, *que varía proporcionalmente á la 2ª potencia* de esta unidad fundamental, tiene dos dimensiones (ó que *su dimensión es* 2) relativamente á la unidad fundamental ; y en general, que toda unidad derivada que es del grado *n* respecto de la unidad fundamental tiene *n dimensiones* (ó que *su dimensión es n*) relativamente á la unidad fundamental.

Por ejemplo, una velocidad v se obtiene en un movimiento uniforme, dividiendo el espacio recorrido l por el tiempo θ empleado en recorrerlo, de manera que resulta $v = \frac{l}{\theta}$. Esta relación es la que sirve para definir la unidad de velocidad C. G. S. : dícese que la unidad de velocidad V es la del móvil que recorre uniformemente la unidad de longitud L en la unidad de tiempo T. Se tiene, pues, entre estas tres unidades la relación $V = \frac{L}{T}$, que también se puede escribir, conforme á una notación usada en álgebra, $V = L.\,T^{-1}$. Según esta ecuación, se dirá que la velocidad es de la dimensión 1 relativamente á la unidad de longitud y de la dimensión (— 1) respecto á la unidad de tiempo.

Fórmulas de definición. — Ecuación de las dimensiones. — La ecuación $v = \frac{l}{\theta}$, que nos ha servido para encontrar las *dimensiones* de la unidad de velocidad, es lo que se llama la *fórmula de definición* de la unidad de velocidad. Cada unidad derivada, en un sistema de unidades absolutas, se enlaza con las unidades fundamentales por medio de una relación análoga. Esta relación expresa analíticamente ya una definición, ya alguna propiedad geométrica ó mecánica, ya una ley física.

La ecuación $v = \frac{l}{\theta}$ conviene á la unidad de velocidad como á toda velocidad : de ella hemos deducido que la unidad de velocidad varía proporcionalmente al espacio recorrido, es decir, á la unidad de longitud, y en razón inversa de la unidad de tiempo, es decir del segundo. Esta relación de las unidades se expresa habitualmente por la ecuación.

$$\text{unidad de velocidad} = \frac{\text{unidad de longitud}}{\text{unidad de tiempo}},$$

1. Por causa del sentido especial que la palabra micrómetro tenía antes, los micrógrafos que se sirven de esta unidad secundaria la llaman ordinariamente *micrón*.

que se escribe también de manera abreviada

$$\text{velocidad} = \frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}}, \text{ó en fin}$$

$$V = \frac{L}{T} = L\,T^{-1},$$

En esta última forma, la fórmula de definición se llama *ecuación de las dimensiones* de la velocidad.

De esta relación hemos deducido que la unidad de velocidad es de la dimensión 1 con referencia á la unidad de longitud y de la dimensión (— 1) respecto de la unidad de tiempo. Las dimensiones de cada unidad derivada se determinan por medio de una ecuación análoga, que se deduce análogamente de su fórmula definitiva.

Ejemplo de una conversión de unidades. — *Sea, por ejemplo, V' la velocidad de un tren de camino de hierro que ande 60 kilómetros por hora : se pregunta cuál es esta velocidad en unidades C. G. S.*

Sea v el valor numérico C. G. S. Según la definición de este valor (73,2°), tenemos,

$$\frac{v}{v'} = \frac{L'\,T^{-1}}{L\,T^{-1}} = \frac{L'}{L}\,\frac{T}{T'}.$$

Pero

$$\frac{L'}{L} \quad \text{es} \quad \frac{60^{kil}}{1^{cm}} = \frac{60\,000\,00^{cm}}{1^{cm}} = 60\,000\,00$$

y

$$\frac{T}{T'} \quad \text{es} \quad \frac{1^{s}}{1^{h}} = \frac{1^{s}}{3600^{s}} = \frac{1}{3600}.$$

Sustituyendo estos valores numéricos, resulta

$$v = 60 \times 60\,000\,00 \times \frac{1}{3600} = 100\,000.$$

Observación. — El problema recíproco sería resuelto del mismo modo, convirtiendo un valor numérico, obtenido en cierto sistema de unidades absolutas, en el valor numérico correspondiente de otro sistema cualquiera de unidades absolutas (*suponiendo que los dos sistemas no se diferencien entre sí más que por la magnitud de las unidades fundamentales*).

78. **Dimensiones y ecuaciones de las dimensiones de las principales unidades mecánicas derivadas.** — Todos los problemas de este género podrán ser resueltos, sea cual fuere la unidad derivada de que se trate, con tal de conocer las dimensiones. He aquí, pues, las ecuaciones correspondientes á todas las unidades mecánicas antes definidas.

1°. Unidad de velocidad C. G. S.

Fórmula de definición : $v = \frac{e}{\theta}$.

Ecuación de las dimensiones : $V = \frac{L}{T} = LT^{-1}$.

Dimensiones : 1 respecto de la longitud, — 1 respecto del tiempo, — 0 respecto de la masa.

2°. Unidad de aceleración C. G. S.

Fórmula de definición : $v - v_0 = \gamma\theta$, de donde $\gamma = \frac{v - v_0}{\theta}$.

Ecuación de las dimensiones. — Vese, con arreglo á esta fórmula, que la aceleración es proporcional á una diferencia de velocidad, es decir á una velocidad ó

á $\frac{L}{T}$, é inversamente proporcional á un tiempo, es decir á T. Tiénese pues

$$G = \frac{\frac{L}{T}}{T} = \frac{L}{T^2} = LT^{-2}.$$

Dimensiones : 1 (longitud), — 2 (tiempo), — O (masa).

3°. Dina.

Fórmula de definición : $f = m\gamma$.

Ecuación de las dimensiones. — La fuerza es proporcional á una masa y á una aceleración. Tiénese pues

$$F = MG = \frac{ML}{T^2} = MLT^{-2}.$$

Dimensiones : 1 (longitud), — 2 (tiempo), — 1 (masa).

4°. Erg.

Fórmula de definición : $w = fe$.

Ecuación de las dimensiones. — El trabajo es proporcional á una fuerza y á un camino recorrido. Tiénese, pues,

$$W = FL = \frac{ML}{T^2} . L = \frac{ML^2}{T^2} = ML^2 T^{-2}.$$

Dimensiones : 2 (longitud), — 2 (tiempo), — 1 (masa).

5°. Unidad de potencia C. G. S.

Fórmula de definición : $p = \frac{w}{t}$.

Ecuación de las dimensiones. — Se ve que la potencia varía en razón directa del trabajo y en razón inversa del tiempo. Tiénese pues

$$P = \frac{W}{T} = \frac{ML^2}{T^3} = ML^2 T^{-3}.$$

Dimensiones : 2 (longitud), — 3 (tiempo), — 1 (masa)[1].

MEDIDA DE LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES.

79. **Generalidades sobre las medidas y los instrumentos de precisión.** — Casi todas las medidas que es necesario efectuar en física pueden reducirse á medidas de longitud, de masa y de tiempo, magnitudes fundamentales del sistema C. G. S. Así, las medidas de extensión se reducen á medidas de líneas. Análogamente, las medidas de fuerzas se reducen á medidas de masas, toda vez que las fuerzas se comparan con los pesos y que éstos se expresan en función de las masas y de la aceleración de la gravedad ($P = Mg$). Como las medidas científicas exigen gran exactitud, ha habido que fabricar instrumentos especiales para efectuarlas; estos son los que se llaman *instrumentos de precisión;* refiérense, pues, á tres tipos principales.

1. No hemos definido aquí más que las unidades relativas á las magnitudes estudiadas precedentemente. Definiremos las demás á medida que vayan presentándose en el curso de esta obra.

I. *Instrumentos de medida* para las *dimensiones lineales* (largos, anchos, gruesos, alturas). Son :

1°. La *regla graduada*, llamada vulgarmente *metro ;*
2°. El *vernier* ó *nonius* rectilíneo y el circular:
3°. El *esferómetro ;*
4°. El *catetómetro ;*
5°. El *micrómetro ocular ;*
6°. El *comparador ;*
7°. La *máquina de dividir.*

II. — *Instrumentos de medida para las masas, los pesos y las fuerzas.*

Las masas se aprecian por medio de la *balanza*, que es el instrumento de precisión por excelencia. Puede servir indirectamente para la medida de los pesos y de las fuerzas, toda vez que estas magnitudes pueden deducirse de la medida de las masas. Pero ya hemos visto (23) que es posible medir directamente las fuerzas con los instrumentos especiales llamados *dinamómetros*, que no son aparatos de precisión.

III. — *Instrumentos de medida para el tiempo.*

El tiempo es una magnitud que se puede medir también directamente con gran precisión. Los instrumentos utilizados para ello son los *relojes* y los *cronómetros*. La marcha de los primeros se hace regular mediante las oscilaciones isócronas de un péndulo (72), y la de los cronómetros con un muelle metálico : ambos se arreglan, conforme á las observaciones astronómicas y especialmente al paso de las estrellas, de modo que suministren una subdivisión del tiempo medio exactamente igual al *segundo de tiempo medio*, unidad de tiempo C. G. S.

80. **Reglas graduadas.** — **Metro-tipo.** — Las *reglas graduadas*, que sirven en las medidas ordinarias, son generalmente láminas planas de latón, divididas en milímetros. La distancia de las dos líneas extremas es exactamente de 1 metro, á la

Fig. 59.

temperatura de 0° : se la comprueba por comparación con el *metro-tipo*, mediante el instrumento de precisión llamado *comparador*. Las rayas intermedias distan un milímetro una de otra; se las marca con el instrumento de precisión llamado *máquina de dividir.*

Cuando se mide una longitud por medio de una regla graduada, se encuentran generalmente cierto número de divisiones, esto es, de milímetros, *más* un resto. No es posible pensar en calcular este resto mediante una nueva subdivisión de la regla, pues el 1/2 milímetro se lee ya con gran dificultad; es preciso saber valorar esta fracción á simple vista [1], ó bien recurrir á un instrumento de precisión.

Los metros-tipos que sirven para la comprobación de las reglas graduadas son copias exactas del *tipo-internacional*, fabricado no hace mucho tiempo por la comisión internacional del metro. Este tipo-internacional es á su vez una copia exacta del *metro-normal* depositado en los Archivos franceses. Pero mientras

1. El físico logra, después de prolongado ejercicio, valorar á simple vista el décimo de milímetro, como el astrónomo aprecia con el oído el décimo de segundo.

este último es un *metro de extremidades*, quiere decir, una barra que alcanza 1 metro de longitud de punta á punta, el tipo-internacional es un *metro de señales*, que representa el metro por la distancia de dos marcas, colocadas á un centímetro próximamente de sus extremidades. Esta disposición facilita más que la primera sacar copias exactas. El metro internacional no se ha hecho de platino, sino con una aleación de este metal y de iridio (platino iridiado) que es más resistente y más inalterable aún que el platino puro. Por fin, se le ha dado la forma de un sólido simétrico de cuatro ranuras (fig. 59), que según los trabajos de Tresca, parece presentar el máximum de resistencia á la flexión. Las dos marcas que definen la longitud del metro están hechas en el plano que contiene el centro de gravedad del sólido.

Las copias del metro internacional son enteramente análogas al tipo y se las funde también con platino iridiado.

81. **Vernier ó nonius.** — 1°. *Definición.* — El vernier es un instrumento de precisión que permite calcular longitudes más pequeñas que las últimas divisiones de una regla ó de un círculo marcador, no obstante que presenta por sí divisiones casi iguales á las de éstos y fáciles de leer igualmente. Según que el vernier se adapta á una regla recta ó á un limbo circular, así se le llama *vernier rectilíneo* ó *circular*[1].

2° *Descripción del vernier rectilíneo.* — Este instrumento no se encuentra nunca solo; adáptase siempre á una regla graduada, ya independiente, ya fija en otro instrumento.

Compónese en todos los casos de una pequeña regla graduada *ab* que puede deslizarse á lo largo de la regla grande AB, de modo que las dos graduaciones se toquen (fig. 60). Generalmente se le da una longitud igual á 9 divisiones de la regla grande, ó sean 9 milímetros, y después se la divide en 10 partes iguales.

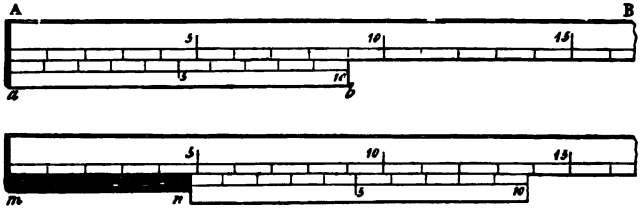


Fig. 60 y 61.

De aquí resulta que cada división del vernier *ab* es inferior á las de la regla AB en un décimo de milímetro. Así se obtiene *un vernier de un décimo*, que es el más usado; puede servir para calcular longitudes con aproximación de menos de un décimo de milímetro.

3°. *Uso del vernier rectilíneo.* — Supongamos que se trate de medir la longitud de un objeto *mn* (fig. 61). Colócase éste á lo largo de la regla grande y así se observa que tiene, pongamos por ejemplo, una longitud de 4 divisiones *más* una fracción. Esta fracción es la que se va á medir con el vernier. Para ello se le hace resbalar sobre la regla fija, hasta que vaya á colocarse en la extremidad del objeto *mn*, y después se mira en qué punto se efectúa sensiblemente la coincidencia entre las marcas de las dos escalas. Se ha supuesto (fig. 61) que ocurre en la octava división del vernier, á partir del punto *n*. Este indica que la fracción que se trata de medir es igual á 8 décimos de una división de la regla grande, ó sean 8 décimos de milímetro.

En efecto, como las divisiones del vernier son inferiores en un décimo á las de la regla, se ve que á partir del punto de coincidencia, yendo de derecha á izquierda, están sucesivamente en retraso respecto de las de la regla, en 1, 2 ó 3

1. El invento del vernier rectilíneo se debe al geómetra francés Pedro Vernier, que ha dado su nombre al instrumento. El circular parece haber sido ideado mucho antes por el geómetra portugués Núñez ó Nonius (1542).

décimos. Desde la extremidad n del vernier á la 4ª división de la regla hay pues, 8 décimos : luego mn igual á $4^{mm},8$.

4ª. *Verniers rectilíneos de un vigésimo, de un quincuagésimo*, etc. — Para obtener esta longitud con aproximación de un vigésimo ó de un quincuagésimo de milímetro, bastaría dar al vernier una longitud de 19 ó 49 milímetros, y después dividirlo en 20 ó 50 partes iguales : entonces se tendría un vernier *de vigésimos* ó de *quincuagésimos*. Así por ejemplo, el catetómetro está provisto de un vernier *de quincuagésimos*.

5ª. *Vernier circular*. — El vernier puede servir también para medir arcos de círculo, y esta parece haber sido precisamente su primera aplicación. Entonces se compone de un pequeño arco de círculo graduado, sostenido en la extremidad de una alidada (fig. 62). Es igualmente móvil á lo largo del círculo graduado, como la reglita pequeña sobre la regla grande del instrumento precedente. La teoría y el uso del vernier circular son idénticos á los ya explicados respecto del rectilíneo.

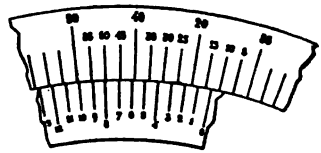


Fig. 62.

6ª. *Caso particular en el uso del vernier. — Puede suceder que ninguna marca de éste corresponda con una de las de la regla.*

En este caso se encuentran *necesariamente* dos marcas consecutivas del vernier que están comprendidas enteramente entre dos consecutivas de la regla. Supongamos (fig. 63) que sean las marcas 7 y 8. La distancia de cada una de ellas á la inmediata de la regla es una longitud $< \frac{1}{10}$ de milímetro, puesto que la suma de

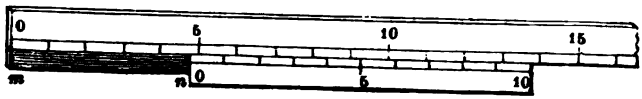


Fig. 63.

esas dos distancias es precisamente igual á $\frac{1}{10}$ de milímetro. Así pues, efectuando la medida como si uno ú otro coincidieran, se cometería un error menor que $\frac{1}{10}$ de milímetro. Admitiendo la coincidencia de la marca inferior 7, se reduce la longitud que hay que medir, y el error se comete por defecto; tomando la marca 8, el error es por exceso. En este caso se tendrá pues :

$$mn = 4^{mm},7 \text{ con aproximación de } \frac{1}{10} \text{ de milímetro, por exceso,}$$

ó bien

$$mn = 4^{mm},8 \text{ con aproximación de } \frac{1}{10} \text{ de milímetro, por defecto.}$$

Compréndese que si se puede distinguir, ya á simple vista, ya con el vidrio de aumento, cual de los dos intervalos es más pequeño, y se elige la marca correspondiente á este, se cometerá un error inferior á $\frac{1}{20}$ de milímetro (por exceso ó por defecto).

Falta demostrar que siempre hay una división del vernier comprendida enteramente entre dos marcas consecutivas de la regla. En efecto, la fracción de mn que va más allá de la marca 4 de la regla, es igual á $\frac{n^{mm}}{10} + \varepsilon$, siendo n un número entero igual todo lo más á 9 y ε una fracción $< \frac{1}{10}$. La distancia de la marca O del vernier á la marca anterior de la regla es precisamente $\left(\frac{n}{10} + \varepsilon\right)^{mm}$; la distancia de la marca anterior de la marca precedente de la regla será pues $\left(\frac{n-1}{10} + \varepsilon\right)$, y así sucesivamente. Continuando de este modo, se encontrará de O á 10 una marca del vernier cuya distancia á la marca anterior de la regla grande será ya sólo de ε; por consiguiente, yendo siempre hacia la derecha, se hallará pri-

mero una marca del vernier á la distancia $\frac{1}{10}$ de milímetro, y luego otra á la distancia $\left(\frac{9}{10} + \iota'\right)$, siendo $\iota' < \frac{1}{10}$: esta última marca y la precedente de la regla comprenden por tanto entre ellas una división entera del vernier.

82. **Tornillo micrométrico.** — 1°. *Definición.* — Llámase *tornillo micrométrico* á todo tornillo que puede servir para causar cambios de posición muy lentos y regulares. El *tornillo micrométrico* no es, hablando en propiedad, un instrumento de precisión, pero sirve de órgano esencial á muchos de éstos.

2°. *Generación y propiedades del tornillo.* — Sea una hélice de espirales numerosas y compactas, trazada sobre un largo cilindro recto (fig. 64). Imaginemos que se mueva en la superficie del cilindro un pequeño rectángulo *abcd* hallándose sometido á las condiciones geométricas siguientes :

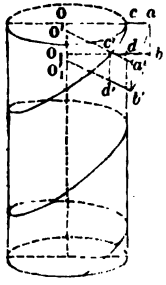


Fig. 64.

1°. Su plano es contantemente normal al cilindro.

2°. El vértice *c* del rectángulo describe la hélice directora.

En este movimiento, todos los puntos del rectángulo describen evidentemente hélices del mismo paso que la hélice directora. El lugar geométrico de todas estas hélices es un volumen de forma helicoidal, que se llama *red* del tornillo, y el tornillo mismo está constituido por el conjunto de la red y del cilindro director. Llámase *paso* del tornillo al de una cualquiera de las hélices descritas por los diversos puntos del rectángulo generador.

El plano normal á la superficie cilíndrica, que contiene el rectángulo generador, es lo que se llama un *plano de perfil*, ó sencillamente un *perfil*.

De la figura del perfil depende la forma de la red. En el caso del grabado, el tornillo es de *red rectangular*.

Pero en la mayor parte de los tornillos de los instrumentos de precisión, la red es *triangular;* lo engendra un *perfil* que es un triángulo casi isósceles, cuya base es precisamente igual al paso de la hélice ; de aquí resulta que la superficie del cilindro director está completamente cubierta por la red (fig. 115).

3°. *Construcción del tornillo.* — Realízase prácticamente el tornillo tallando la red sobre un cilindro de metal, bronce, hierro ó acero. Á cada tornillo se une una *tuerca*, sin la cual no puede funcionar. La tuerca es una pieza metálica que presenta en hueco el relieve de la red. Cuando se hace entrar el tornillo en la tuerca, si ésta es fija, imprimiendo un movimiento de rotación á la extremidad anterior del tornillo llamada *cabeza* del mismo, el tornillo avanza en su tuerca paralelamente al eje del cilindro director : este es el que se mueve cuando se hace girar la cabeza del tornillo : el movimiento es paralelo al eje del cilindro, pero en sentido inverso de la rotación. La ley de este movimiento es en ambos casos consecuencia de la propiedad fundamental de la hélice : *Si se supone que la tuerca sea móvil, uno cualquiera de estos puntos avanza sobre el tornillo describiendo una de las hélices que constituyen la red. El avance longitudinal de este punto, y por consiguiente la tuerca toda entera, es proporcional al ángulo de rotación de la cabeza de tornillo.*

El *tornillo micrométrico* es un tornillo hecho con mucho cuidado y cuyo paso es muy pequeño, igual á un semi-milímetro ó á 1 milímetro lo más, y muy regular. Se le practica en el contorno de un cilindro perfectamente homogéneo de bronce ó de acero fundido, por medio de procedimientos mecánicos muy perfeccionados.

83. **Esferómetro.** — 1°. *Definición.* — El esferómetro [1] es un instrumento de precisión que puede servir para los usos siguientes :

Medida de los gruesos pequeños.

Comprobación de la curvatura de las superficies esféricas y medida de su radio.

De esta última aplicación se deriva precisamente su nombre.

2°. *Descripción.* — El instrumento se compone esencialmente de un tornillo micrométrico móvil en una tuerca fija (fig. 65). La tuerca se coloca verticalmente en el centro de un trípode que descansa, mediante tres puntas finas de acero templado, sobre un plano de vidrio muy bien pulimentado al esmeril. Las extre-

1. De σφαῖρα, esfera, y μέτρον, medida.

midades de las puntas forman los vértices de un triángulo equilátero, y la vertical del centro de este triángulo coincide con el eje de la tuerca y el del tornillo. Este tiene un paso muy regular, igual á $\frac{1}{2}$ milímetro. Termina inferiormente en una punta roma y arriba en una cabeza de forma de botón rayado mediante la cual se le puede manejar fácilmente. Dando vueltas en el sentido conveniente se puede llevar la punta del tornillo al plano de la peana; girando en sentido contrario se levanta el tornillo.

Estos movimientos verticales son siempre proporcionales á los ángulos de rotación. Mídeseles con facilidad y precisión por medio de la disposición siguiente: en una de las ramas del trípode se encuentra fija verticalmente una regla metálica, cuya orilla delgada está dividida en semi-milímetros. Por otra parte, un disco delgado, cuyo limbo tiene 500 divisiones, se fija horizontalmente por su centro sobre la cabeza del tornillo, que lo arrastra consigo en su movimiento de rotación, de manera que todas sus divisiones van pasando sucesivamente delante de la orilla de la regla fija, orilla que sirve de índice.

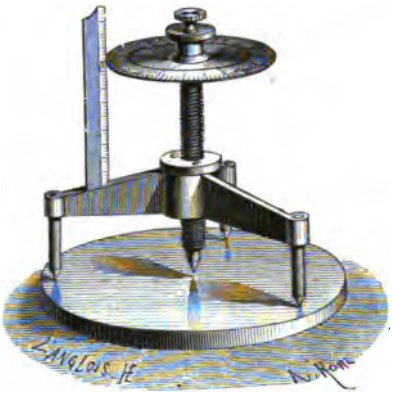


Fig. 65.

Cuando ha pasado delante del índice una sola división del limbo, el tornillo se ha movido $\frac{1}{500}$ de altura de su paso, es decir $\frac{1}{1000}$ de milímetro; cuando el disco ha dado una vuelta completa, el tornillo se ha movido la altura del paso, es decir $\frac{1}{2}$ milímetro, y entonces el disco ya no está frente á la misma división de la regla, sino en presencia de la siguiente.

3°. *Usos.* — *Medida de un grueso.* — Supongamos que se trata de medir por ejemplo el grueso de un espejo de caras paralelas. Llévase la punta del tornillo al plano del disco de vidrio y se toma nota de la división del limbo y de la del cuchillo, que están una frente á otra; sea n_0 la primera y h_0 la segunda.

Después se levanta el tornillo una altura suficiente para intercalar el espejo entre el plano y la punta, y luego se baja esta otra vez hasta hacerla coincidir exactamente con la cara superior del espejo; sean n_1 y h_1 las dos divisiones que se encuentran frente á frente en la segunda posición.

El grueso del espejo es medido evidentemente por el camino vertical que recorre la punta: ahora bien, este es igual á un número de semi-milímetros indicado por las divisiones del cuchillo, *más* una fracción del paso marcada por las divisiones del disco. Tendremos, pues, llamando e al grueso,

$$e = \left(\frac{h^1 - h_0}{2} + \frac{n_1 - n_0}{1000}\right)^{mm}.$$

Medida de un radio de curvatura. — Supongamos que se trate de averiguar la esfericidad de una superficie convexa, por ejemplo de un vidrio para anteojos y medir su radio de curvatura.

Colócanse las tres puntas A, B, C del instrumento sobre la superficie, y se lleva la punta central O en coincidencia (fig. 66). Los cuatro puntos O, A, B, C determinan una superficie esférica. Moviendo el instrumento sobre el vidrio, la coincidencia no cesará si este es esférico; pero si en el caso de que la superficie no tenga el mismo radio de curvatura en todos sus puntos.

Supongamos que sea perfectamente esférica y tratemos de medir su radio R. En una cualquiera de las posiciones del instrumento, el plano de las tres puntas inferiores corta á la esfera según un círculo mínimo, AMBC. Este círculo es precisamente igual al circunscrito en el triángulo equilátero que tiene sus tres pun-

tas como vértices. Bastará construir el triángulo ABC, cuyos tres lados se conocen, y después el círculo circunscrito, para tener el radio r (fig. 67).

Luego se mide la distancia $OO' = e$ de la punta roma al centro del círculo. Para ello basta con volver á colocar el instrumento tal como está en su plano

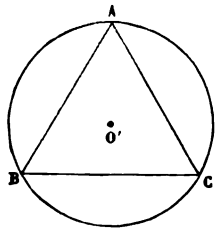


Fig. 66.

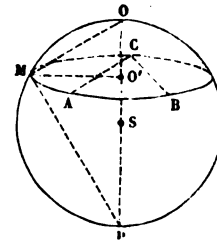


Fig. 67.

de vidrio, tomar nota de las divisiones h, n del frente, y después llevar la punta del tornillo al plano de sostén y apuntar las nuevas divisiones n_0, h_0, del frente. Entonces se tiene según la fórmula antes expuesta.

$$e = \left(\frac{h_1 - h_0}{2} + \frac{n_1 - n_0}{100}\right)^{mm}.$$

Conociendo r y e se obtiene R por la fórmula conocida $2R = e + \frac{r^2}{e}$.

Observaciones. — 1°. El mismo método se aplicaría al caso de una superficie esférica cóncava.

2°. Si se quisiera medir el grueso de un cuerpo filiforme, tal como un cabello, que no pueda ser colocado directamente bajo el tornillo, no habría más que ponerlo entre la peana y una lámina de caras paralelas de grueso conocido e. Midiendo entonces el grueso total e' del sistema por el método antes indicado, resulta

$$x = e' - e.$$

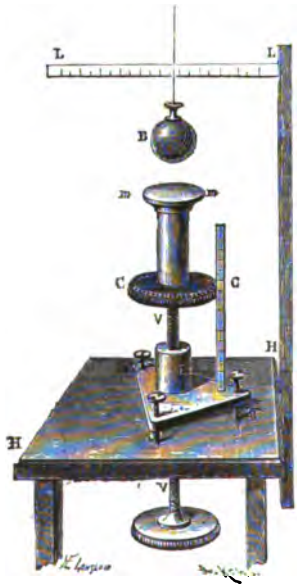


Fig. 68.

84. **Aplicación del tornillo micrométrico aparato de Borda.** — El aparato que Borda imaginó para medir con precisión la longitud de su péndulo, era análogo á un esferómetro.

1°. *Descripción.* — Compónese de un tornillo micrométrico V, móvil en una tuerca fija E (fig. 68), que está sólidamente mantenida, con ayuda de un trípode de tornillos (v, v, v), sobre una peana horizontal HH. El tornillo sostiene en su extremidad un pequeño plano de acero mm perfectamente perpendicular al eje del cilindro, y algo más abajo un círculo graduado CC, cuyo limbo se mueve girando delante de un cuchillo graduado. La regla horizontal LL, que está detrás del péndulo B, servía para medir las amplitudes de las oscilaciones.

2°. *Operación.* — Tratábase de determinar a, esto es, la distancia del eje de suspensión al centro de la esfera B. Disponíase el aparato debajo de esta esfera, y

dando vuelta al tornillo se levantaba lentamente el plano *mn*, hasta que llegara á tocar la esfera en su punto inferior. El contacto se obtenía en el momento en que se veía desaparecer la llama de una bujía que estaba previamente dispuesta detrás del péndulo á cierta distancia. Se comprobaba que no se había pasado del simple contacto haciendo oscilar el péndulo : sólo debía oirse ligero roce contra el plano.

Hecho esto, se levantaba el péndulo reemplazándolo por una regla graduada, provista de una cuchilla de suspensión en su parte superior y de una lengüeta móvil que formaba vernier en la inferior. Entonces no había más que llevar la punta de la lengüeta en contacto del plano *mn*, y leer directamente la distancia del plano al eje de suspensión : esta es la longitud que precedentemente hemos llamado λ (108) : obteníase $\lambda = a + r$.

Para medir r se colocaba la lentejuela del péndulo sobre el plano *mn* y se movía el tornillo hasta que la lengüeta vernier llegara á tocar la esfera, en su punto más alto esta vez. La distancia λ', que entonces se leía en la regla, era igual á $a - r$. Tomando la semi-suma de las dos lecturas $\frac{\lambda + \lambda'}{2}$, se tenía a ; tomando la semi-diferencia $\frac{\lambda - \lambda'}{2}$, se tenía r.

85. **Máquina de dividir.** — 1°. *Definición.* — Es un instrumento de precisión que puede servir para los usos siguientes :

Dividir una longitud dada en un número determinado de partes iguales.
Trazar divisiones de una longitud determinada.
Medir exactamente una longitud.

2°. *Descripción.* — La máquina de dividir se compone esencialmente de un tornillo micrométrico fijo V que sostiene una tuerca móvil. El cilindro del tornillo está cogido en sus dos extremidades por dos collares (fig. 69), en que puede girar sin cambiar de sitio, con frotamiento suave. La rotación se efectúa por medio de una manivela M, que está enlazada con la cabeza del tornillo; los ángulos de

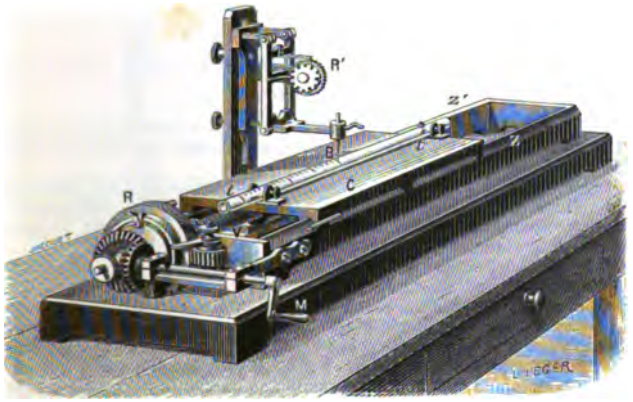


Fig. 69.

rotación se miden por medio de un disco de limbo graduado R, sostenido por su centro cerca de la cabeza del tornillo, como el del esferómetro y que da vueltas con él delante de un índice fijo. La tuerca abarca el tornillo y no puede girar con él, sino que tiene que avanzar ó que retroceder según el sentido de la rotación. Como el paso es de un milímetro y el círculo está dividido en 100 partes, se mueve la tuerca $\frac{1}{100}$ de milímetro por cada división. Á la tuerca está unida una carretilla de acero C, que anda con él resbalando por el marco *zz'*. En B se ve el

buril, es decir, el instrumento de punta de acero ó de diamante que sirve para hacer las marcas sobre los metales ó en el vidrio : el aparato impone longitudes especiales á las divisiones de 5 en 5 y de 10 en 10.

Un mecanismo cuya disposición varía según cual es la casa constructora, permite, mediante la combinación de una rueda de garfio que forma cuerpo con el tornillo y de un sistema doble de topes y descansos, hacer girar fácilmente á la manivela un ángulo cualquiera, variable á voluntad, poco idéntico á sí mismo, durante toda una experiencia.

3°. *Usos. — Supongamos que se trate de marcar* n *divisiones iguales sobre un tubo de vidrio.*

Colócase el tubo *tt* paralelamente al tornillo V. En una operación preliminar se cuentan los números de vueltas y de centésimos de vuelta necesarios para hacer andar la punta del buril entre los puntos extremos : sean $p + \frac{q}{100}$ estos números. Es evidente que para obtener n divisiones iguales será preciso practicar una marca cada vez que se hayan ejecutado $\frac{1}{n}\left(p + \frac{q}{100}\right)$ vueltas á partir del punto O.

Observación. — La operación preliminar antedicha hace ver como se utiliza la máquina para medir con precisión una longitud cualquiera K. Tiénese en milímetros

$$K = p + \frac{q}{100}.$$

Supongamos que se quieran marcar divisiones de longitud dada.

Se fija la longitud que se trata de graduar, tubo de vidrio ó regla metálica, lo mismo que anteriormente. Sea l la longitud en milímetros del grado de la escala que se desea marcar. El número de vueltas y de centésimos de vuelta correspondientes á esta longitud, está dado por la ecuación precedente

$$p + \frac{q}{100} = l.$$

Bastará, pues, con parar la carretilla y marcar una división cada vez que se haya adelantado $\left(p + \frac{q}{100}\right)$ vueltas del tornillo.

86. **Catetómetro.** — 1°. *Definición.* — Es un instrumento de precisión que *sirve para medir la distancia vertical de dos puntos dados*, por ejemplo la diferencia de nivel entre dos columnas líquidas [1].

2°. *Principio.* — El instrumento consiste esencialmente (fig. 70) en un vástago vertical graduado (fig. 73), á lo largo del cual puede deslizarse un anteojo horizontal con que se miran sucesivamente dos puntos : su distancia vertical está dada por el camino que recorre el anteojo á lo largo del vástago.

3°. *Descripción.* — El *cuerpo* del catetómetro está sostenido por una columna de acero de 1m,20 de alto, montada sobre un trípode de tornillos de nivel. Dase ese nombre de cuerpo á un tubo hueco de latón PQ, que entra como un mango en la columna de acero y gira libremente en torno suyo. Efectivamente, el tubo PQ está coronado por un casquete de cobre z (fig. 71) cuya cabeza se encuentra atravesada por un tornillo de acero x. La punta de este descansa sobre la extremidad axial de la columna, de modo que cuando se da vuelta al tornillo, se levanta el tubo PQ, que de este modo queda suspendido y puede girar; lo guía en su parte inferior un collar que abarca un gorrón cónico reservado á la base de la columna.

A lo largo del tubo PQ se deslizan dos carretillas AB y CD, unidas entre sí por un tornillo de aproximación t, que es micrométrico (fig. 72). La primera sostiene un anteojo LL' y un nivel de burbuja de aire mn, montados en una horquilla móvil alrededor de un eje c fijo en el cuerpo del catetómetro. A la horquilla se encuentra unida una palanca i, que se inclina más ó menos por medio de un tornillo de aproximación p, para obtener la horizontalidad del nivel y del anteojo.

1. De esta aplicación se deriva su nombre (κατέτος, línea vertical, y μέτρον, medida).

El botón K que pone en movimiento el tornillo *t*, presenta en su circunferencia una graduación en 100 partes; un punto de mira *o*, fijo en la pieza DC, permite calcular de manera precisa los ángulos de rotación. Como el paso del tornillo *t* es de $\frac{1}{2}$ milímetro, se sigue de aquí que cuando se da al botón K vuelta un grado, la carretilla AB y el anteojo se mueven $\frac{1}{100}$ de milímetro. Fi-

Fig. 70.

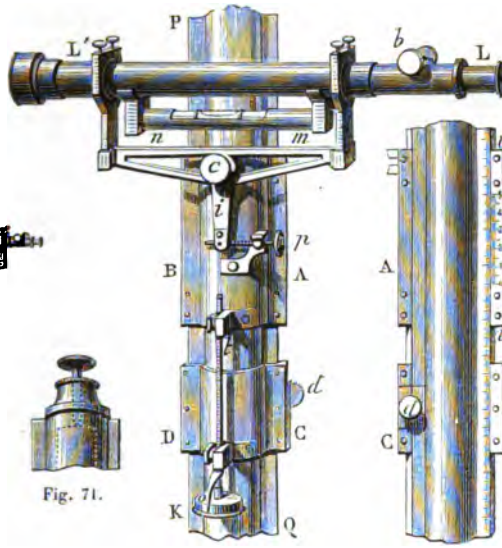


Fig. 71.

Fig. 72.

Fig. 73.

nalmente, en toda la longitud del tubo PQ hay una escala en milímetros, representada á la derecha de la figura 73; un vernier *vv'* enlazado con la carretilla A, se desliza á lo largo de la escala.

4°. *Operación.* — Para determinar la posición de un punto, se bajan ó se suben las dos carretillas y con ellas el anteojo, hasta que se encuentre éste á la altura del punto que se desea observar; después, fijando la carretilla DC por medio de un tornillo de presión *d*, se da vuelta lentamente al botón K mirando el punto en cuestión por medio del anteojo. Párase el movimiento en el instante preciso en que la imagen del punto va á coincidir con el cruce de los hilos del retículo Entonces se cónoce una horizontal donde se encuentra el punto considerado: esta línea es el *eje óptico* del anteojo. Para obtener la altura exacta sobre el cero de la escala, no hay más que leer la indicación del vernier en ésta. Opérase del mismo modo para determinar la altura del segundo punto dado. La diferencia entre los dos números obtenidos es igual á la distancia vertical de los dos puntos.

5°. *Manera de arreglar el catetómetro.* — Las indicaciones de este instrumento no son exactas sino en el caso de que el instrumento esté bien arreglado. Las operaciones necesarias al efecto consisten en lo siguiente:

I. *El eje óptico del anteojo debe ser paralelo á la línea de los puntos de mira del nivel.*

II. *El eje óptico del anteojo debe ser perpendicular al eje de rotación.*

III. *El eje de rotación del instrumento debe ser vertical.*

Observación. — El arreglo del catetómetro es una operación muy delicada cuya exposición necesita el conocimiento de la teoría del nivel y de la de los anteojos, así como el uso de términos nuevos, tales como eje óptico, retículo, línea de los puntos de mira, etc., que todavía no hemos definido. Así es que aplazamos hablar de este arreglo hasta tratar de los anteojos.

87. **Micrómetro ocular.** — Llámase así un microscopio provisto de un ocular micrométrico, que sirve para medir *una pequeña longitud* (fig. 76).

Para medir la longitud comprendida entre dos marcas paralelas cercanas t, t', se dispone, por encima de las marcas y frente á ellas, un microscopio M, de manera que las imágenes T, T' de las marcas t, t', suministradas por el objetivo O, se formen en el plano del retículo R (fig. 75).

Fig. 74.

El ocular de Ramsden O', que sirve para la observación, permite además distinguir la imagen P (fig. 74) de una especie de peine situado muy cerca del plano del retículo.

Hállase sostenido el retículo por medio de un marco que recibe un movimiento de traslación de un tornillo micrométrico. Este tornillo es puesto en movimiento con el botón B; un tambor graduado D solidario de B permite valorar, gracias al punto de mira r, las fracciones de vuelta del tornillo. Un giro completo de éste hace moverse el retículo una longitud igual á la distancia entre dos dientes consecutivos del peine.

De modo que contando el número de vueltas que hace pasar al retículo f de T á T' se obtendrá la longitud tt'.

Sea n este número, generalmente fraccionario, y N el de vueltas que corres-

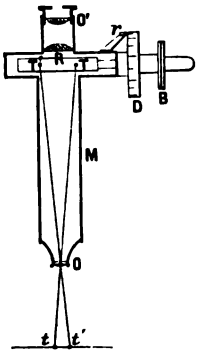


Fig. 75.

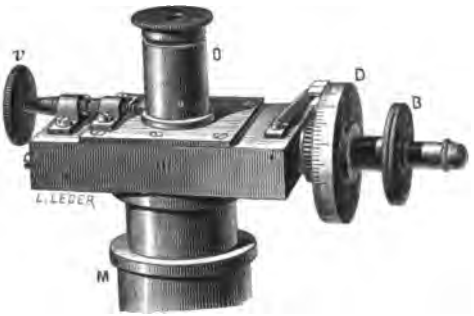


Fig. 76.

ponden á la medida previa de una longitud dada l situada en tt'. Resultará como medida L de la longitud buscada

$$L = n \cdot \frac{l}{N}.$$

Un muelle apoya al tornillo contra su tuerca de modo que no haya *tiempo perdido.*

El valor $\frac{l}{N}$ se llama la *tara del micrómetro.*

88. **Comparador.** — Obtiénese un comparador disponiendo dos microscopios parecidos al que acabamos de describir, de modo que sus ejes resulten paralelos (fig. 77).

Los ejes de los dos microscopios distan entre sí la longitud cuyas pequeñas variaciones se trata de apreciar por medio de los *micrómetros oculares*.

Habiendo llevado los retículos á las extremidades de la longitud que se trata de calcular (altura barométrica, distancia entre las dos cuchillas de un péndulo reversible, etc.), se reemplaza dicha longitud por una regla graduada cuidadosa-

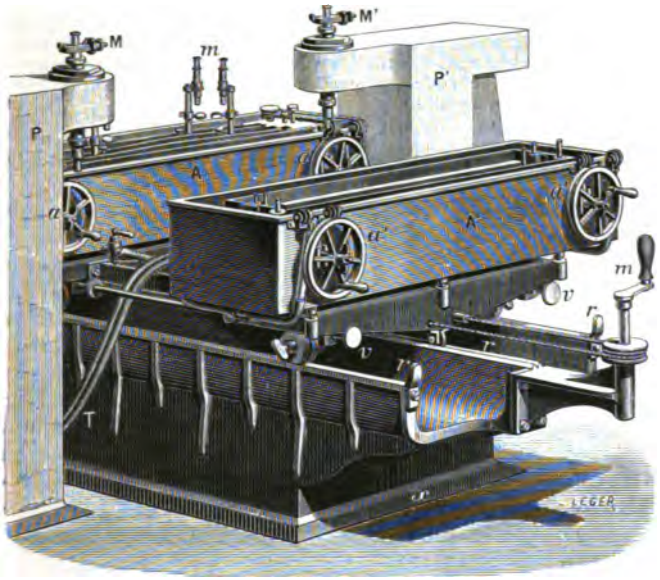


Fig. 77.

mente y se mueven los retículos de los micrómetros hasta llevarlos á coincidir con la imagen de las marcas más próximas, interiores ó exteriores á la longitud medida. En el primer caso, á las divisiones n_1, n_2 así consideradas habrá que añadir los movimientos v_1 y v_2 del micrómetro, de manera que

$$x = (n_2 - n_1) + v_1 + v'_1.$$

En el segundo caso

$$x = (n'_2 - n'_1) - (v'_2 + v'_2).$$

Conócese el número de vueltas que corresponden al movimiento $v_1 + v'_1$ igual á una división de la regla, de donde se deduce la tara del microscopio M_1; análogamente se obtiene, por medio del movimiento $v_2 + v'_2$, la tara de M_2.

En el comparador que usan en la *oficina internacional de pesas y medidas*, en Sèvres (fig. 77), los dos microscopios M, M' están fijos en columnas de mampostería P, P' por medio de fuertes escuadras.

Las reglas de comparar se encuentran situadas en dos artesas paralelas A, A', de doble envoltura, sostenidas por un carrete móvil sobre una firme base de fundición *rx*. Esta base descansa en una gruesa capa de argamasa aglomerada.

Los bancos de las artesas interiores que mantienen las reglas están provistos en sus extremidades de diversos tornillos de arreglo que permiten poner en su punto las marcas terminales de las reglas.

Compréndese sin dificultad el manejo de este aparato. En una de las artesas se encuentra un metro-tipo y una copia que se trata de comparar con él en la otra; los retículos se llevan á coincidir con las marcas límites de la copia. Por

el juego de la manivela m se reemplaza la primera carretilla por la segunda; mediante el movimiento de los tornillos micrométricos v, v se acaba esta sustitución. Entonces hay que poner en acción los tornillos micrométricos de los microscopios para restablecer la coincidencia con las imágenes de las marcas. Estos movimientos micrométricos, unidos á la tara, dan á conocer por su valor y sus sentidos la diferencia de las longitudes de ambas reglas. Las artesas se cubren con tapaderas provistas de aberturas convenientes y contienen agua cuya temperatura se lee en termómetros convenientemente alumbrados, recostados en abrazaderas á derecha é izquierda de las barras. Unos pequeños microscopios sirven para estas lecturas. En a, a' se ven las manivelas que gobiernan á los agitadores del agua. Más adelante explicaremos cómo permite el comparador medir las dilataciones lineales.

MEDIDA DE LAS MASAS, DE LOS PESOS Y DE LAS FUERZAS.

89. **Definición y generalidades.** — Las masas y los pesos se pueden medir con ayuda de un instrumento de precisión, la *balanza*, y por una misma operación, la *pesada*. Sábese en efecto que entre la masa M de un cuerpo y su peso P existe la relacción general $P = Mg$. Como el valor de g es conocido con mucha aproximación en los diferentes puntos del globo, bastará medir *directamente* una de las magnitudes P y M; el valor de la otra se deducirá por la fórmula precedente.

Los pesos son los que se empezó por medir directamente. Eligióse una unidad, el *gramo*, derivada del metro. El método de medida consiste en equilibrar el peso desconocido X con un *peso marcado*, esto es, conocido y graduado de antemano en unidades. Sea P este número de gramos: tiénese evidentemente $X = Pg$, según la definición misma de la igualdad de las fuerzas. Conociendo el peso P del cuerpo, se deducía su masa.

Pero esta unidad de peso es á su vez un producto de dos factores, de los cuales uno, la masa M es constante, y el otro, la aceleración g, variable con la latitud: de aquí se deduce que la misma unidad es variable con la latitud. Un gramo de París, definido como el peso de un centímetro cúbico de agua pura (á 4°) en París, no es el mismo peso que un gramo de Lima definido de la misma manera. En consecuencia, dos pesadas, hecha una en París y otra en Lima, que dieran el mismo número de gramos, no serían comparables. Inversamente, dos pesadas que indicaran números distintos, podrían corresponder á dos pesos idénticos. Por ejemplo, una masa de oro que pesara 1000^g en Lima (en gramos de Lima) pesaría en París

$$1000 \times \frac{980,96}{978,34} = 1002^g,678 \text{ (en gramos de París)}$$ [1]

1. Siendo 980,96 y 978,34 los valores de g en París y en Lima, se tiene, llamando M al valor constante de la masa de oro, p y p' á sus pesos diferentes en Lima y en París,

$$p = M.\,978,34,$$
$$p' = M.\,980,96,$$

de donde

$$\frac{p'}{p} = \frac{980.96}{978.34} \quad \text{y} \quad p' = p\,\frac{980.96}{978.34}.$$

Por este motivo, la comisión de las unidades C. G. S. ha tomado como unidad fundamental una *unidad de masa*, la masa del gramo. Apréciase, pues, directamente, con ayuda de la balanza, la masa de un cuerpo, determinando cuantas veces está contenido en ella el gramo-masa: este número M es invariable. De ahí se deduce el peso, variable en cada punto del globo, aplicando la fórmula $P = Mg$.

90. **Balanzas.** — 1°. *Definiciones.* — Llámase *balanzas* á instrumentos que sirven para determinar directamente la masa de los cuerpos é

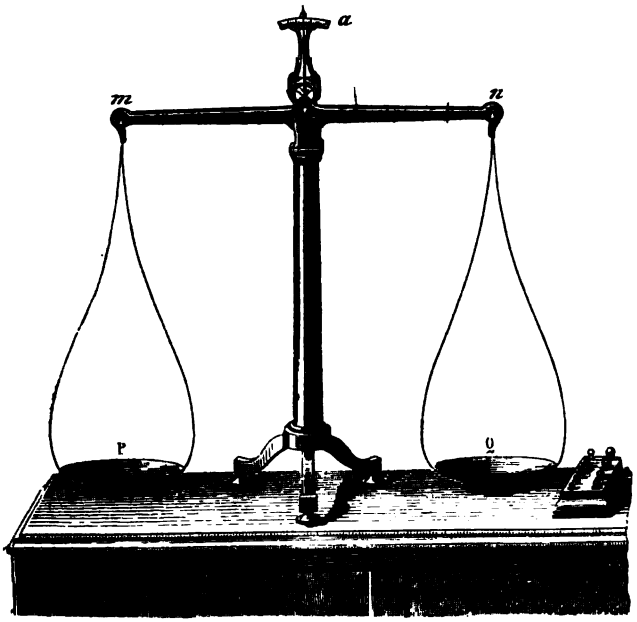


Fig. 78.

indirectamente su peso. La operación se llama *pesada:* consiste en hallar una masa conocida, graduada en gramos-masa (*pesos contrastados*), que tenga *la misma masa* que el cuerpo.

Fabrícanse dos clases de balanzas: las ordinarias y las *de precisión.*

2°. *Descripción de una balanza ordinaria.* — La balanza ordinaria (fig. 78) consiste en una palanca de primer género, descrita en todos los tratados de Mecánica *mn*, llamada *fiel*, en cuyas extremidades se cuelgan dos *platillos* P Q, del mismo peso, y que se destinan á recibir, uno los objetos que se desea pesar, y el otro pesos conocidos. El fiel está atravesado en su parte media por un prisma de acero, llamado *cuchillo*, cuya arista viva constituye el *eje de suspensión* del fiel; esta arista descansa por sus dos extremidades sobre dos piezas

pulimentadas de ágata ó de acero, que constituyen la *chapa*, y esta disposición reduce mucho el rozamiento del eje. En las extremidades se adaptan dos prismas más pequeños, cuyas aristas vivas están vueltas hacia arriba y son paralelas á las del cuchillo central. De estas aristas cuelgan, por medio de garfios, los platillos P y Q. Es indispensable que las tres aristas vivas, *o*, *m* y *n* sean rigurosamente paralelas entre sí y que se encuentren en un mismo plano.

Por fin, en la parte superior del fiel y perpendicularmente á su dirección se encuentra fija una larga aguja que oscila delante de un arco graduado *a*, fijo y sostenido por una columna de latón donde descansan la capa y el fiel.

En las balanzas más ordinarias, la aguja está dirigida de abajo arriba y tiene por consiguiente un desarrollo limitado describiendo un arco de magnitud media. En las balanzas actuales, aun cuando sean poco precisas, se vuelve la punta hacia abajo (fig. 84), lo que da á la aguja mayor longitud y más recorrido, y á la balanza sensibilidad superior, pues así pueden observarse movimientos muy pequeños del fiel.

Dícese que la balanza está *en equilibrio* cuando la aguja se detiene en el cero del arco graduado, ó cuando oscila entre dos marcas equidistantes del cero. Si la balanza está bien fabricada y es conveniente su instalación, la línea de los cuchillos *m*, *o*, *n* tiene *horizontalidad perfecta*.

La columna descansa en un pie de tornillos de nivel, por medio de los cuales se le da la posición vertical.

3°. *Cajas de pesos marcados.* — Con cada uno de estos instrumentos se vende una *caja de pesas*, que contienen una serie de masas (vulgarmente *pesos marcados* ó *pesas contrastadas*) graduadas en unidades C. G. S., quiere decir, en gramos-masas.

Los pesos usuales forman tres series : los *pesos grandes*, que van desde 1 á 50 kilogramos; los *pesos medios*, del gramo al kilogramo ; y los *pesos pequeños*, desde el miligramo y sus subdivisiones al gramo : los primeros no se utilizan en los laboratorios; sólo sirven para los usos industriales y comerciales y en los aparatos para grandes pesadas que se llaman *balanzas de almacén*, *balanzas de mostrador* y *balanzas-básculas*. Las demás series sirven para las balanzas de laboratorio y están contenidas en las *cajas de pesos marcados*.

Los pesos medios son de cobre amarillo y tienen la forma de cilindro; algunos también representan dedales, conos truncados que encajan unos en otros. Los pequeños pesos marcados son de platino ó de cobre amarillo y en general se reducen á placas cuadradas, muy finas, con uno de sus ángulos un tanto alzado para que se pueda cogerlos con las pinzas. Ordinariamente una caja de pesos de laboratorio contiene varias series de cuatro pesos :

Pesos medios.	Serie de las unidades.	2 pesos iguales	á	1g.	1 p.	igual	á	2g.	1 p.	igual	á 5g.
	Serie de las decenas .	2	—	á	10g.	1	—	á	20g.	1	— á 50g.
	Serie de las centenas.	2	—	á	100g.	1	—	á	200g.	1	— á 500g.

Es fácil ver que cada una de estas series suministra, por una asociación conveniente, todos los pesos desde 1 hasta 9, y su conjunto todos los pesos desde

1g á 999 g Hay tres series análogas para los pequeños pesos marcados, que permiten todas las combinaciones desde 0g,1 hasta 0g,001.

Observaciones. — I. La mayor parte de los pesos marcados que se encuentran en el comercio y los laboratorios han sido graduados en *gramos-peso* y no en *gramos-masa*. Pero como la unidad de masa C. G. S. es precisamente la masa de un cuerpo que pesa 1 gramo-peso métrico, síguese de aquí que los pesos marcados, graduados en gramos peso, permiten determinar directamente las masas de los cuerpos pesados.

II. Todos los pesos marcados pasan por haber sido *contrastados en el vacío* : esto quiere decir que sólo en estas condiciones tienen el peso que se les atribuye. Pero como las pesadas se efectúan en el aire, resulta una disminución en el valor de cada peso marcado, por causa de la impulsión vertical que la atmósfera ejerce sobre todos los cuerpos sumergidos en ella.

4°. *Condiciones de precisión.* — Una balanza no pude servir para pesar los cuerpos con exactitud, sino en tanto cuanto es al mismo tiempo *precisa* y *sensible*.

Definición de la precisión. — Se dice que una balanza es *precisa* cuando su fiel se mantiene en equilibrio, estando vacíos los platillos ó habiendo en ellos pesos iguales.

Enunciado de las condiciones. — Hay dos condiciones de precisión necesarias y suficientes :

I. *El centro de gravedad de la parte móvil (fiel, platillos y accesorios) debe encontrarse en la vertical del punto de suspensión cuando el fiel está en equilibrio.*

II. *Los dos brazos del fiel deben ser rigurosamente iguales.*

Demostración. — Si se imagina un plano vertical que pase por el eje de simetría del fiel, este plano corta las aristas de los tres cuchillos en los puntos o, m, n (fig. 79). El punto o se llama *punto de suspensión*; m y n son los *puntos de amarre*. Por éstos deben pasar las resultantes del peso de la parte móvil y de los pesos colocados en los platillos. Los *brazos del fiel* son las distancias om y on.

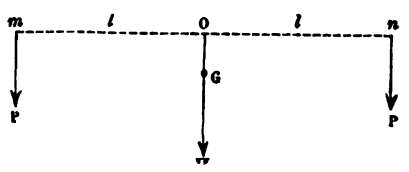


Fig. 79.

Supongamos satisfechas las condiciones de precisión. Vese primero que, si están vacíos los platillos, el fiel no es solicitado más que por una sola fuerza, el peso ω de la parte móvil. Este peso se aplica en el centro de gravedad G, y no tiene más efecto que el de sostener al fiel sobre su soporte; *la resistencia de éste lo destruye*, y el fiel se mantiene necesariamente en equilibrio.

Cuando los platillos están cargados de pesos iguales P, el fiel se encuentra sometido á tres fuerzas paralelas. La fuerza ω pasa siempre por el punto o. Las dos fuerzas P tienen una resultante paralela, igual á su suma y aplicada también en el punto o, puesto que este punto divide en dos partes iguales la distancia mn de sus puntos de aplicación. Estas fuerzas todas quedan, pues, anuladas por la resistencia del soporte, y el fiel se mantiene en equilibrio.

Observaciones. — I. *Utilidad de los cuchillos.* — No basta que los brazos del fiel sean iguales mientras se encuentra en equilibrio, sino que también han de permanecer siéndolo durante sus oscilaciones. Para satisfacer á esta condición se hace que los platillos descansen sobre dos prismas, cuyas aristas vivas constituyen, en todas las inclinaciones del fiel, los puntos de amarre de los platillos.

II. *Condición de comodidad.* — Á estas condiciones se agrega ordinariamente la que sigue : *el centro de gravedad de la parte móvil debe estar por debajo de la arista del cuchillo.* Pero esta no es, hablando con propiedad, una *condición de precisión*, sino más bien *de comodidad.* Si no se la cumpliese, la balanza seguiría siendo precisa, pero de empleo muy incómodo. En efecto, si el centro de gravedad estuviera por encima de la arista de suspensión, el fiel no podría tomar sino una posición de equilibrio inestable (54), muy difícil de obtener y muy fácil de concluir. La menor trepidación bastaría para hacer vacilar el fiel, aun en el caso de que los platillos estuvieran cargados con pesos iguales : en tal caso se dice que la balanza *está loca.* Si el centro de gravedad coincidiera con la arista del cuchillo, el efecto de aquella fuerza sobre el fiel quedaría anulado en todas las posiciones de éste ; entonces el fiel no podría oscilar y se limitaría á tomar bruscamente la inclinación máxima hacia el lado en que se colocara el más ligero peso.

Por el contrario, si se encuentra satisfecha la condición ya expuesta, resultan dos ventajas : 1°. cuando los platillos están vacíos ó cargados con pesos iguales, el fiel se mantiene en un estado de equilibrio estable, al cual vuelve siempre después de tiempo más ó menos largo que depende de la sensibilidad ; 2°. cuando los pesos son desiguales, el fiel se inclina hacia el peso mayor y toma una nueva posición de equilibrio, cuya inclinación es casi proporcional á la diferencia de los pesos.

5°. *Condiciones de sensibilidad.* — *Definición de la sensibilidad.* — Dícese que una balanza es *sensible* cuando indica, mediante notable inclinación del fiel, pequeñas diferencias entre los pesos que se trata de comparar.

La sensibilidad de una balanza se aprecia por el ángulo que el fiel se inclina, ó más bien por el movimiento de la aguja sobre el arco graduado para aumento de carga determinado. Así, se dirá que una balanza es *sensible al miligramo*, si la aguja se mueve *visiblemente* cuando añadimos un miligramo en uno de los platillos, después de obtenido el equilibrio.

Hay que distinguir la *sensibilidad absoluta* de la *sensibilidad práctica.* La primera caracteriza al instrumento empleado, la segunda depende un tanto de la habilidad del observador y mucho más de los métodos que emplea para observar los movimientos de la aguja.

Sea α el ángulo que el fiel se inclina para un aumento de carga p, y r la longitud de la aguja ; es evidente que la *sensibilidad absoluta* está dada por

$$\frac{r\alpha}{p}.$$

Podría tomarse como sensibilidad-tipo de las balanzas, pongamos por ejemplo, la de uno de estos aparatos cuya aguja se moviera 1 milímetro para un aumento de carga de 1 miligramo.

Condiciones. — Una balanza es tanto más sensible, para un mismo aumento de carga colocado en uno de platillos :

1°. *Cuanto más largos son los brazos del fiel.*

En efecto, se ha visto precedentemente que la fuerza que hace in-

clinar el fiel es el exceso de peso (P — Q) aplicado al caso de la palanca *od;* pero este, que es la proyección de *om'* sobre *om*, es tanto mayor cuanto más largo es el brazo del fiel: luego la acción de (P — Q) crece con la longitud del fiel.

2°. *Cuanto menor es el peso de la parte móvil.*

3°. *Cuanto más cerca del eje de suspensión está el centro de gravedad del fiel.*

En efecto, la resistencia que se opone á la inclinación del fiel es precisamente el peso ω aplicado al brazo de palanca *oi*, y *oi* es la proyección de *og'* (=*og*): luego, mientras más pequeñas sean las cantidades ω y *og*, más débil será la resistencia á la inclinación.

Tales son las condiciones propiamente dichas de sensibilidad. Para que ésta permanezca independiente de la carga total, precisa realizar además la condición siguiente:

4°. *Los tres puntos de suspensión de los platillos y del fiel deben estar en línea recta.*

6°. *Demostración algébrica de las condiciones de sensibilidad.* — I. *Caso de un fiel recto.* — Sea α el ángulo *mom'* (fig. 80), que representa la inclinación del fiel, y *p* la diferencia P — Q de los pesos colocados en los platillos.

La condición de equilibrio está expresada por la ecuación

$$[1] \qquad p.\, od = \omega.\, oi.$$

Pero el triángulo rectángulo *dom'* da $od = om' \cos. \alpha$, y el triángulo *oig'* da $oi = d$ sen. α. Sustituyendo tenemos.

$$[2] \qquad pl \cos \alpha = \omega d \operatorname{sen} \alpha, \qquad \text{de donde} \qquad \operatorname{tang} \alpha = \frac{pl}{\omega d}. \qquad [2\ bis]$$

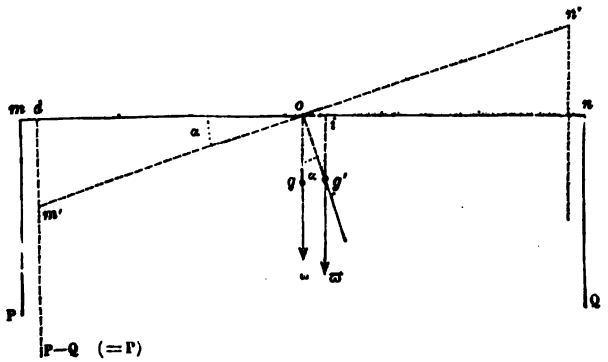


Fig. 80.

Ahora bien, el ángulo α es generalmente bastante pequeño para que se pueda reemplazar su tangente trigonométrica por el arco α, que mide la inclinación y, en consecuencia, la sensibilidad de la balanza: se ve, pues, que la fórmula [2 *bis*] comprende las tres primeras condiciones.

Por lo demás, la sensibilidad es independiente de la carga total, pues ésta, (2Q + *p*), no entra en la fórmula.

II. *Caso de un fiel acodillado.* — Supongamos, por ejemplo, que el ángulo β sea

agudo (fig. 81) y adoptemos las mismas anotaciones que en el caso precedente. Sea α la inclinación del fiel *mon* bajo la influencia del exceso de carga p.

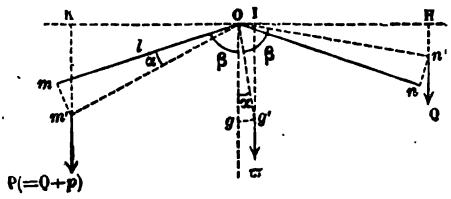


Fig. 81.

La condición de equilibrio es la misma que anteriormente.

Aquí los brazos de palanca no son ya los brazos mismos del fiel, sino sus proyecciones OI, OH y OK sobre la horizontal del punto de apoyo. La ecuación es, pues

$$(Q+p)\,OK = Q.OH + p.OI.$$

Reemplazando OK, OH, y OI por sus valores en función de los elementos de la balanza, resulta

$$(Q+p)\,l \operatorname{sen}(\beta-\alpha) = Q.\,l \operatorname{sen}(\beta+\alpha) + \omega d \operatorname{sen}\alpha.$$

De ahí se deduce

$$\operatorname{tang}\alpha = \frac{pl \operatorname{sen}\beta}{(2Q+p)\,l\cos\beta + \omega d}.$$

La presencia del término $(2Q+p)$ en esta ecuación prueba que cuando el fiel no es recto, la *sensibilidad* no es independiente de la *carga total* $(2Q+p)$.

Se ve además que, en el caso en que nos hemos puesto, quiere decir, cuando β es agudo, la *sensibilidad disminuye* si la *carga total aumenta*, porque el coeficiente cos. β es $>$ O.

Por el contrario, si β *fuera obtuso*, como el término $(2Q+p)\,l$ cos. β sería entonces $<$ O, la sensibilidad aumentaría al mismo tiempo que la carga total.

7°. Observaciones. — Para que las condiciones precedentes tengan eficacia real y duradera, se necesita además realizar en la fabricación de la balanza las dos condiciones mecánicas siguientes :

1°. *El fiel debe permanecer inflexible en el límite de carga de la balanza ;* pues si se dobla, no sólo puede bajar su centro de gravedad, sino también los puntos de amarre de los platillos.

2°. *El rozamiento en los puntos de apoyo del cuchillo y en los de amarre de los platillos, debe ser lo más pequeño posible.* Para obtener este resultado se usan en las balanzas de precisión chapas perfectamente pulimentadas de ágata ó de acero[1].

91. **Balanzas de precisión : Condiciones generales de construcción.** — Las reglas prácticas que deben regir la construcción de estos instrumentos se deducen de la teoría antes expuesta. Débese : 1°. hacer rigorosamente iguales los dos brazos del fiel ; 2°. darles al mismo tiempo mucha longitud y gran ligereza ; 3°. disponer en un mismo plano horizontal y en direcciones paralelas los tres ejes de suspensión del fiel y de los platillos ; 4°. colocar el centro de gravedad de la parte móvil por debajo del punto de suspensión y más ó menos cerca de éste, según el grado de sensibilidad que se desea obtener.

Por desgracia no es posible pasar de ciertos límites en la realización simultánea de estas condiciones, porque en cierto modo son contradictorias. Así, no es posible prolongar l sin aumentar ω. Y hasta han llegado los constructores empíricamente á esta conclusión que para no poner en peligro la rigidez de los fieles debe aumentarse ω más rápidamente que l ; así la tendencia actual es

1. En las balanzas que actualmente se construyen no se emplea el acero para evitar las atracciones magnéticas.

fabricar balanzas de fiel pequeño : tal es el último modelo de balanza de Collot que pronto describiremos.

Desde el punto de vista práctico puede decirse que si las aristas de los cuchillos fueran perfectamente vivas y estuvieran perfectamente pulimentados los planos de ágata, la sensibilidad no tendría límite, bajo la condición de que se empleara un método óptico conveniente para apreciar los movimientos más ínfimos de la aguja indicadora. En efecto, estando suprimido todo rozamiento, á un aumento de carga *p* correspondería, por pequeño que fuera, un movimiento proporcional. En realidad la sensibilidad es limitada; pero con una buena balanza se podría pesar el *centésimo de miligramo* si no debiera temerse que semejante pesada fuera alterada por el más ligero accidente, pongamos como ejemplo, por la caída del más mínimo grano de polvo en uno de los platillos.

Así es que ordinariamente no se estima más que el *vigésimo* de miligramo, lo cual se logra por dos métodos distintos.

1°. Supongamos que se tenga una balanza cualquiera, pero bien construída y provista de un arco finamente graduado, así como de una aguja cuya extremidad se adelgace hasta el punto de hacerla casi invisible á simple vista. En lo interior de la balanza se dispondrá una lente de corto foco, destinada á suministrar una

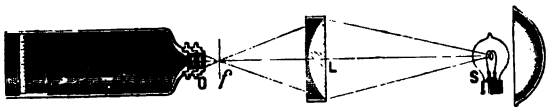


Fig. 82.

imagen muy aumentada de la graduación y de la punta indicadora ; después se observará esta imagen con ayuda de un anteojo de retículo, colocado á 0m,50 de la balanza, que permitirá apreciar claramente los cambios de posición más mínimos.

2°. Se ha obtenido un método más perfecto gracias á una disposición especial, adoptado en las balanzas de la casa Collot (fig. 82).

La aguja lleva en su parte inferior un anillo atravesado por un hilo muy fino *f* (fig. 83), dirigido como el eje mismo de la aguja. Ilumínasele vivamente concentrando allí los rayos de un foco muy brillante y de pequeñas dimensiones, condiciones que presenta una pequeña lámpara eléctrica de incandescencia S. El haz luminoso incide después sobre un sistema óptico, constituído por un objetivo de microscopio, el cual produce una imagen muy aumentada del hilo; éste va á proyectarse en una pequeña pantalla E de vidrio sin pulimentar, provisto de una escala graduada.

Fig. 83.

Observación. — Dispónese generalmente el aparato de manera que *una* división del arco ordinario (1 milímetro próximamente) corresponda á un aumento de carga de 4 miligramos, y *una* división de la escala en vidrio sin pulimentar á 1/5 de miligramo. Esto permite abreviar considerablemente las pesadas de precisión [1].

92. **Balanza de Collot.** — La figura 84 representa una balanza de precisión fabricada por la casa Collot, que permite efectuar sin dificultad pesadas con *un vigésimo de miligramo de aproximación*. Para ponerla á cubierto del polvo y preservarla de la acción oxidante del aire húmedo, lo mismo que de las agitaciones del ambiente durante la pesada, se la guarda en una urna de vidrio, cuya cara anterior se abre á voluntad para permitir operar las pesadas [2]. La peana que

1. Efectivamente, se puede demostrar que si se hace variar la sensibilidad de una balanza modificando la distancia del centro de gravedad, la duración de las oscilaciones es casi proporcional á la raíz cuadrada de la sensibilidad. Y como la *sensibilidad absoluta* ha sido reducida en la proporción de 1 á 20 sin cambio en la *sensibilidad práctica*, vese que la duración de las oscilaciones se ha hecho al mismo tiempo 4 á 5 veces más pequeña.

2. Esta cara no ha sido representada en el dibujo, para no ocultar los pormenores del aparato.

sostiene el instrumento es independiente de la urna, lo cual permite abrir ó cerrar ésta sin que el fiel se mueva.

I. *Fiel.* — Dos montantes de fundición A y A, dispuestos simétricamente, terminan respectivamente en un brazo oblicuo doble; estos dos brazos se reunen en forma de ángulo para sostener un plano de ágata *a* en que descansa el cuchillo central del fiel *aa*. Este fiel consiste en una regla plana de bronce, de figura de rombo prolongado. Para disminuir su peso se le vacía, no dejando subsistir más que los lados del rombo. De esta manera se obtiene un fiel ligero, que

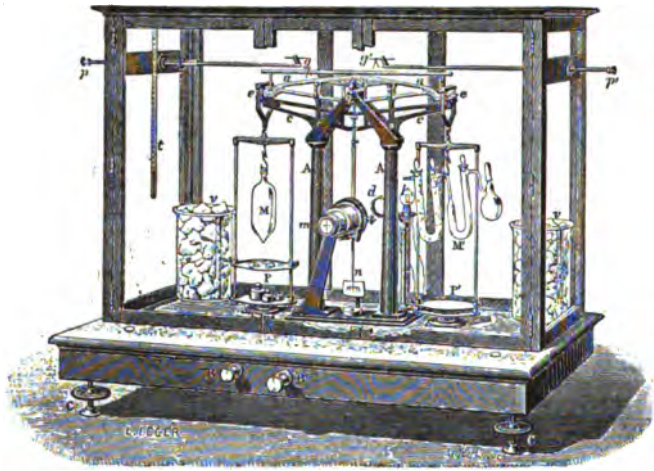


Fig. 84.

conserva tanta mayor resistencia á la flexión cuanto que es corto respecto de los usados en las antiguas balanzas de precisión. Su eje de suspensión se obtiene de manera muy precisa por medio de un prisma triangular de acero templado, ó mejor de ágata, que se engarza perpendicularmente en su centro, y cuya arista inferior, perfectamente rectilínea, descansa sobre el plano de ágata del montante.

II. *Horquilla.* — En cada extremidad del fiel se encuentra fijo un prisma semejante al precedente, pero con la arista hacia arriba, destinado á sostener un plano de ágata del cual se suspende cada platillo por medio de un estribo *e* (fig. 86). Si estos prismas permanecieran en contacto con los planos de ágata, sus aristas se mellarían, perdiendo la balanza en sensibilidad. Evítase este inconveniente gracias á la horquilla, pieza móvil, que permite levantar los platillos y el fiel cada vez que la balanza no funciona.

Consiste en una pieza de fundición *c*, *c*, tan larga como el fiel, que se levanta ó baja rozando suavemente entre los dobles brazos oblicuos del soporte central, por medio de dos varillas que atraviesan los montantes y que se pueden manejar desde fuera. El botón B sirve para levantar el fiel y el B', mediante mecanismo análogo, para alzar los platillos sobre dos sostenes móviles colocados debajo.

La figura 85 representa un mecanismo análogo al que dirige la horquilla. Compónese de una palanca *ab* colocada debajo de la peana. Esta palanca, móvil en torno de un eje horizontal A, está articulada por un extremo con una varilla D unida á la horquilla y que la pone en movimiento; en el otro extremo sostiene un apéndice *a* sobre el cual ejerce presión una pieza cilíndrica C, tallada á modo de hélice en su base. Esta pieza da vueltas gracias al botón B. Cuando el borde inclinado de la pieza C va á apretar el apéndice *a* y lo baja, la varilla D es levantada y con ella la horquilla. Si se hace girar en sentido contrario, la varilla D baja y la horquilla desciende.

En la arista inferior del fiel y debajo del punto de suspensión, se ha fijado verticalmente y en la aguja indicadora un tornillo de paso muy pequeño. Un botón rayado *s* (fig. 86), taladrado como tuerca, puede moverse á lo largo del tornillo; cuando se le hace subir ó bajar, el centro de gravedad de la parte móvil se eleva ó desciende en la vertical, lo que hace aumentar ó disminuir al mismo tiempo la sensibilidad de la balanza.

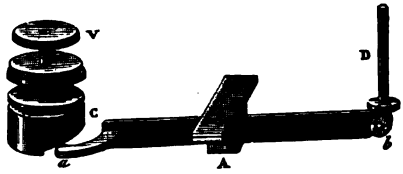


Fig. 85.

Observación. — En la balanza Collot se puede ejercer también acción sobre el centro de gravedad para llevarlo exactamente al plano se simetría del instrumento. Con tal fin basta mover el tornillo *ni* (fig. 86) que atraviesa el cuchillo central, de manera que penetre más ó menos.

Pesos marcados de precisión. — Con las balanzas de precisión van unidas necesariamente cajas de pesos exactos por completo. En las series de los submúltiplos del gramo (decigramo, centigramo, miligramo) se sustituye de ordinario un

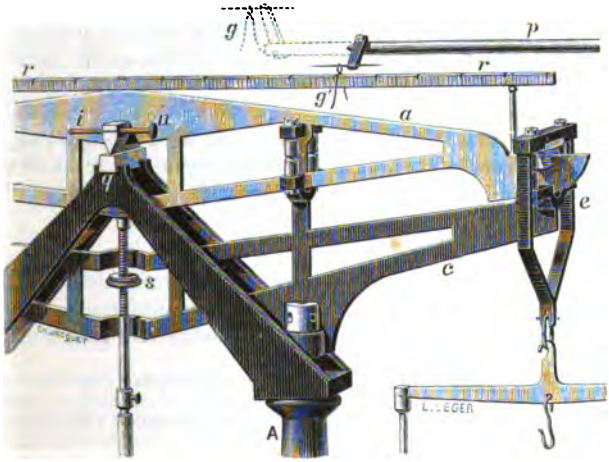


Fig. 86.

peso 2 á un peso 1, porque el peso 2 es más fácil de manejar que el 1: ventaja práctica sensible, por causa de la extremada pequeñez de estos pesos, que van hasta el *décimo de miligramo*.

Evítase aun mejor esta dificultad de manejo para las fracciones de miligramo, empleando en lugar de aquéllos unos pequeños *jinetes g, g'*, formados por un hilo de platino que pesa exactamente 1^{mmg} (fig. 86). Se les corre á lo largo de una regla plana metálica *r, r*, fija encima del fiel, paralelamente á su dirección.

La regla se divide en diez partes iguales, marcadas por ranuras que se encuentran, la primera en la vertical del punto de suspensión y las demás en las verticales de los puntos de amarre m_1 m y n_1 n. Según la teoría de la palanca, un jinete de 1 centigramo, colocado en la última ranura, es decir, una de las verticales *m* ó *n*, pesará sobre el platillo con todo su peso; situado en la vertical del medio del brazo O*m*, el jinete no ejercerá ya sobre el platillo más que un esfuerzo de 1/2 centigramo, es decir, de 5^{mmg}; colocado en la primera ranura, á partir del punto O_1, pesará sobre el platillo como 1/10 de centigramo ó 1^{mmg}; en

una palabra, el jinete, que se corre á lo largo de la palanca, *ejerce un esfuerzo proporcional á su distancia al eje de suspensión.*

Estos jinetes pueden ser manejados desde fuera de la urna; las varillas laterales *pg*, *p'g'* permiten cogerlos por la anillita superior.

En las antiguas balanzas de precisión, la tuerca reguladora de la sensibilidad estaba colocada encima del fiel, lo que estorbaba al manejo de los jinetes. Obsérvase que en la balanza Collot no hay nada que impida, por el contrario, hacer pasar un jinete de un lado á otro del fiel.

Límite de precisión de la balanza. — Las balanzas de precisión que son sensibles al miligramo para una carga total de un kilogramo, son instrumentos que se construyen mucho; ya las hay sensibles al *millonésimo.*

Deleuil construyó en otro tiempo para Regnault una balanza sensible á 1^{mmg} dada una carga de 10 kilogramos[1]; la sensibilidad era, pues, de $\frac{1}{10^{9}}$.

En la oficina internacional de pesas y medidas se ha llevado la precisión mucho más lejos. Tomando ciertas precauciones y observando á distancia de las balanzas, cuya urna no se abría, se han llegado á pesar 100 kilogramos con aproximación de 1^{mmg}, es decir, con precisión de un *cien-millonésimo.*

93. **Diferentes métodos de pesada.** — La pesada de un cuerpo puede efectuarse por tres métodos :

La *simple pesada*, que se emplea para las medidas ordinarias ; la *doble pesada* y el método *de transposición*, usados en las medidas de precisión.

1°. *Simple pesada.* — Consiste sencillamente en colocar el cuerpo en uno de los platillos y pesos conocidos en el otro hasta que la aguja del fiel vuelva al cero. Sea X el cuerpo que se trata de pesar y P la suma de los pesos marcados ; tiénese la ecuación de equilibrio,

$$Xl = Pl, \quad \text{de donde} \quad X = P.$$

Este método supone esencialmente que los brazos del fiel son rigurosamente iguales : así es que se emplean de preferencia uno de los dos métodos siguientes, que no suponen satisfecha esta condición[1].

1. Sin embargo, cuando se trata de efectuar una serie de pesadas referentes al mismo experimento y cuando los pesos no intervienen sino por sus relaciones, la condición de igualdad de los brazos del fiel se hace superflua, y se puede recurrir á « la simple pesada », más expeditiva que cualquier otro método.

Ejemplo de una pesada simple de precisión. — La figura 84 fué dibujada durante una de las pesadas que efectuó en el Laboratorio de trabajos físicos M. A. Leduc, profesor conferenciante en la Facultad de Ciencias de Paris, para determinar la composición del agua.

Á la derecha se ve el pequeño aparato que sirve para recoger el agua formada en la reducción del óxido de cobre por el oxígeno puro y seco ; al otro lado está suspendida una ampolla de vidrio cerrada, que tiene exactamente el mismo volumen exterior que este aparato. La tara se completa por medio de pesos marcados, visibles en el platillo de la izquierda.

En una de las pesadas, la tara se componía, *antes* de la experiencia, de $98^{gr},915$ y el jinete estaba en la división 22 del mismo lado

luego tara total $= 98^{gr},9172$.

Después del experimento, la nueva tara era de $123^{gr},915$, y el jinete se encontraba en la división 11 :

luego tara total $= 123^{gr},7161$.

El peso bruto del agua recogida fué pues $22^{gr},1353$.

Entre las correcciones que hay que hacer sufrir á este peso bruto, señalemos únicamente la más importante, la reducción del vacío, que se elevaba á $0^{gr},02604$.

2°. *Doble pesada.* — Esta se llama también *método de Borda*, porque dicho físico fué el primero en indicarla. Consiste en dos pesadas simples sucesivas. Colócase el cuerpo cuyo peso se desea conocer en uno de los platillos y se le equilibra en el otro con perdigones ó arena[1]: esto se llama *hacer la tara;* después se retira del primer platillo el cuerpo y se le reemplaza por pesos conocidos hasta que el equilibrio se restablezca otra vez. La suma de estos pesos representa exactamente el del cuerpo, pues en estas dos operaciones, el cuerpo y los gramos actúan alternativamente sobre el mismo brazo de palanca para equilibrar la misma resistencia. Compréndese mejor lo dicho escribiendo las ecuaciones que expresan estos dos equilibrios sucesivos. Sean l y l' los dos brazos del fiel, T el peso de la tara, P la suma de los pesos marcados y X el peso del cuerpo. Tiénese sucesivamente

$$[1] \quad Xl = Tl', \qquad\qquad [2] \quad Pl = Tl'$$

Dividiendo miembro á miembro, resulta $X = P$.

3°. *Método de transposición*[2]. — Pésase dos veces el cuerpo por *simple pesada*, colocándolo sucesivamente en cada uno de los platillos.

Escribamos las dos ecuaciones de equilibrio; sean X el punto buscado, P' el peso conocido puesto en el otro platillo, l y l' las longitudes de los brazos de palanca que les corresponden respectivamente. La primera ecuación de equilibrio es

$$[1] \qquad lX = l'P.$$

Análogamente, si se representa por P' el número de gramos que hacen equilibrio al cuerpo después de haberlo cambiado de platillo, se tiene

$$[2] \qquad l'X = lP'.$$

Multiplicando miembro á miembro las igualdades [1] y [2], y suprimiendo el factor común ll' se tiene

$$X^2 = PP', \qquad \text{de donde} \qquad X = \sqrt{PP'}.$$

Luego el peso buscado *es la media proporcional* entre los pesos P y P'.

Observación. — Dividiendo las dos ecuaciones miembro á miembro, se tendría

$$[3] \qquad \frac{l}{l'} = \frac{P}{P'}.$$

Esta igualdad expresa la relación de las longitudes de los brazos en función de los dos pesos, y sirve para calcular los valores buscados.

Si $P = P'$, se tiene $l = l'$; de ahí un método para comprobar una de las condiciones de precisión de la balanza, suponiendo que esté satisfecha la otra.

1. En las pesadas de precisión se usan para hacer la tara pesos marcados ordinarios, que tienen la ventaja de no ensuciar los platillos.

2. Este método no se usa sino en el caso de no disponer de una tara conveniente para efectuar la doble pesada.

LIBRO III

HIDROSTÁTICA

CAPÍTULO PRIMERO

CARACTERES GENERALES DE LOS LÍQUIDOS.

94. **Hidrostática é hidrodinámica.** — La *hidrostática* es la ciencia que tiene por objeto las condiciones de equilibrio de los líquidos y las presiones que éstos ejercen, por efecto de su peso, sea dentro de su propia masa, sea sobre las paredes de los vasos que los contienen.

La ciencia que trata del movimiento de los líquidos se llama *hidrodinámica*[1].

95. **Compresibilidad de los líquidos.** — Según un antiguo experimento de Bacón y de los académicos de Florencia, los líquidos han sido considerados durante mucho tiempo como incompresibles. Mas los trabajos posteriores de varios físicos prueban lo contrario. Resumiremos luego el estado de esta cuestión.

Observación. — *Elasticidad de los líquidos.* — Sea cual fuere la compresión á que se haya sometido un líquido, la experiencia demuestra que apenas termina el exceso de presión, vuelve el líquido exactamente á su volumen primitivo ; de donde se deduce que estos cuerpos son *perfectamente elásticos.*

96. **Principio de igualdad de presión ó principio de Pascal.** — *Enunciado.* — Considerando los líquidos como perfectamente elásticos, dotados de perfecta fluidez, y suponiéndolos libres de la acción de la gravedad, se ha llegado al principio siguiente, que se llama *de igualdad de presión :*

Si se ejerce una presión cualquiera en la superficie de un líquido en equilibrio, esta presión se transmite íntegra en todos sentidos á cualquier porción plana de pared igual á la superficie de presión[2].

1. La aplicación de ésta á la conducción y elevación de aguas recibe especialmente el nombre de *hidráulica.*

2. También se le llama *principio de Pascal*, porque éste lo enunció antes que nadie, en la forma siguiente : *Si un vaso lleno de agua y cerrado por todas partes tiene dos aber-*

Interpretación. — Imaginemos un vaso de forma cualquiera, lleno de agua ó de cualquier otro líquido cuyo peso despreciaremos, y provisto en sus paredes de diversos golletes cilíndricos A, B, C..., de superficie idéntica, cerrados por émbolos móviles (fig. 87). Si se ejerce sobre el émbolo superior A, de fuera á dentro, una presión cualquiera, por ejemplo de 20 kilogramos, esta presión se transmite instantáneamente á la cara interna de los émbolos B, C, D..., que son impulsados todos de dentro á fuera con una fuerza de 20 kilogramos. Las presiones transmitidas serían de 40, 60 kilogramos, si las superficies fueran dos ó tres veces mayores que la del émbolo A.

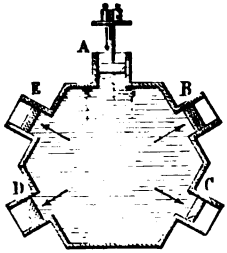


Fig. 87.

Expresión numérica. — Sean S y s las superficies del émbolo grande y del pequeño; puede escribirse.

$$[1] \quad \frac{P}{p} = \frac{S}{s}, \quad \text{de donde} \quad [2] \quad \frac{P}{S} = \frac{p}{s}.$$

97. **Generalización del principio de Pascal.** — 1°. En la igualdad [2], el cociente $\frac{P}{S}$ representa *la presión media por unidad de superficie* sobre la porción de pared constituída por el émbolo grande; análogamente $\frac{p}{s}$ representa *la presión media por unidad de superficie* sobre el émbolo pequeño. En otra porción plana cualquiera de pared s', la presión total sería por ejemplo p', y *la presión media por unidad de superficie* $\frac{p'}{s'}$, de modo que se tendría todavía $\frac{P}{S} = \frac{p'}{s'}$. Esto quiere decir que *en un líquido en equilibrio por la sola influencia de presiones exteriores, la presión media por unidad de superficie es la misma en todos los puntos de la pared del vaso que lo contiene.*

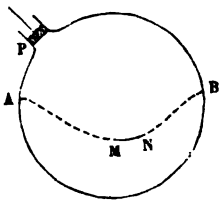


Fig. 88.

2°. Finalmente, el principio se aplica en estas diferentes formas, no sólo á las paredes del vaso que contiene un líquido perfecto en equilibrio, sino también á las moléculas mismas de este líquido. Así, una sección plana MN (fig. 88), formada de moléculas líquidas, y tomada en un

turas, una de las cuales sea céntuplo de la otra, poniendo en cada una de ellas un émbolo ajustado, un hombre que apriete en el émbolo pequeño igualará la fuerza de ciento que empujen el que es cien veces mayor y vencerá á noventa y nueve.

Este segundo enunciado conduce directamente á la interpretación práctica del procedente que es más general.

punto cualquiera de la masa, experimenta una presión proporcional á su superficie, lo mismo que una porción igual de pared.

Presión en un punto. — Como esta expresión se usa mucho en hidrostática, importa precisar su sentido. En realidad no hay presión *en un punto;* una presión no puede ejercerse sino sobre una porción de pared más ó menos pequeña; pero de magnitud apreciable y determinada.

La presión en un punto, en el caso de ser uniforme aquélla, es *la presión por unidad de superficie en torno del punto considerado.*

Hagamos $\frac{P}{S} = \omega$: de ahí se deduce $P = \omega S$.

Observaciones. — 1°. *Caso de las paredes curvas.* La noción de presión en un punto se aplica también á las paredes curvas. Basta con imaginar el plano tangente en el punto considerado de la superficie curva ; en este plano se toma, al rededor del punto, un elemento ω que soporta una presión elemental p. El cociente $\frac{p}{\omega} = \omega$ es la presión por unidad de superficie en el punto considerado.

2°. *Caso de la masa líquida.* — Por fin, la misma definición se aplica también á un punto cualquiera tomado en lo interior de la masa líquida. Basta para generalizarla con repetir el razonamiento que nos sirvió antes al tratar del principio de Pascal.

98. **Dirección de las presiones.** — Todas las presiones que se ejercen, sea en lo interior de un líquido en equilibrio, sea sobre las paredes del vaso que lo contiene, son fuerzas *normales*, quiere decir, perpendiculares á las superficies de presión.

Este hecho puede considerarse coma una consecuencia de la perfecta fluidez de los líquidos y de su simetría absoluta alrededor de un punto cualquiera. En efecto, si suponemos en un punto A una presión P inclinada cierto ángulo α sobre la normal AN, debe existir por razón de simetría otra presión P′, inclinada el mismo ángulo y en sentido contrario. Cada una de estas fuerzas (fig. 89) puede descomponerse en dos componentes, una normal y la otra dirigida por el plano de la superficie de presión. Las dos componentes AP y AP′, iguales y opuestas, se anulan. Las componentes normales, iguales y del mismo sentido, se suman para ejercer una presión normal en el punto donde están aplicadas. Estas son las únicas fuerzas que producen un efecto útil, las únicas que hay que tener en cuenta cuando se estudian líquidos en equilibrio.

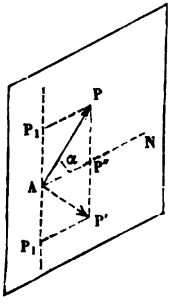


Fig. 89.

99. **Prensa hidráulica.** — 1°. *Definición.* — El principio de igualdad de presión ha sido objeto de importante demostración experimental y al mismo tiempo de aplicación muy útil en la *prensa hidráulica.* Este aparato sirve para producir presiones considerables mediante

esfuerzo relativamente pequeño. Su idea pertenece á Pascal; pero quien lo construyó por primera vez fué el ingeniero inglés Bramah en 1796.

2º. *Descripción.* — El aparato es todo de fundición (fig. 90 y 91). En un cuerpo de bomba B, de gran diámetro y de paredes muy resistentes, se hace subir y bajar con frotamiento suave un cilindro C que hace veces de émbolo. Con él va unido un platillo K, que sube y baja en su compañía á lo largo de cuatro columnas. Estas últimas

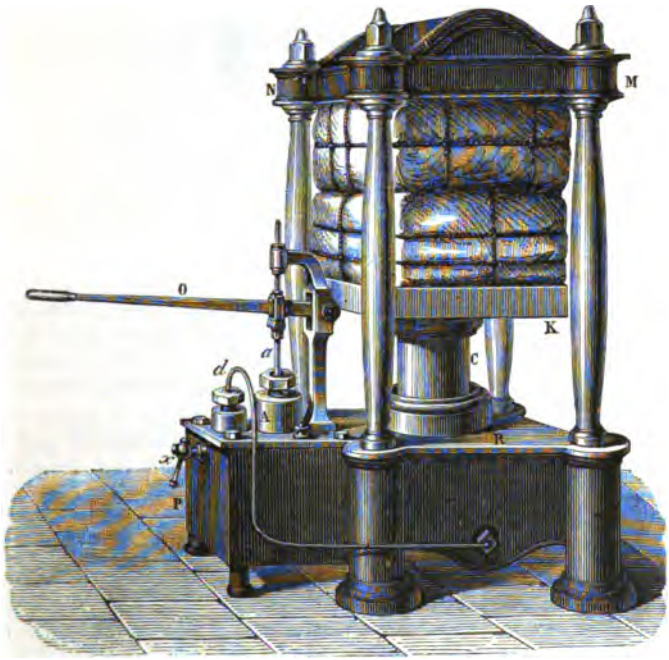


Fig. 90.

sostienen una techumbre MN fija; entre esa techumbre y el platillo K se colocan los objetos que se han de prensar. La ascensión del émbolo C se obtiene por medio de una *bomba de inyección* A, que aspira el agua de un depósito P, y la hace ir al cilindro B. El émbolo *a* de esta bomba se maneja con una palanca O. Al subir el émbolo, la válvula S se abre y el agua se introduce en el cuerpo de bomba A; después, al bajar, esta válvula se cierra, abriéndose otra válvula *m*, que permaneció cerrada durante la ascensión, se levanta á su vez por la presión de abajo arriba que experimenta y el agua es impulsada hasta el cuerpo de bomba B por el tubo *d*.

La filtración del agua entre el émbolo y el cilindro se evita con ayuda del *cuero embutido.* Dase este nombre á un cuero grueso,

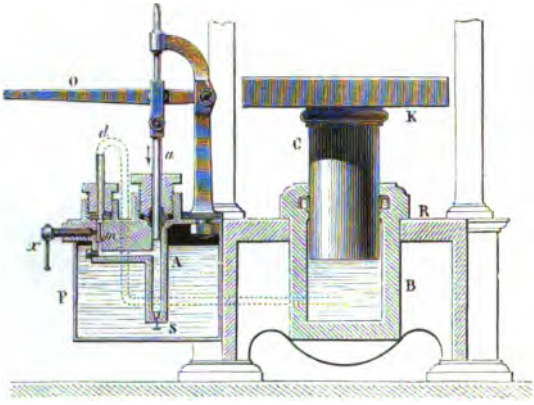


Fig. 91.

empapado en aceite é impermeable al agua y que encorvado en forma de U invertida (fig. 92), se arrolla circularmente en una cavidad practicada en la alto de la pared del cuerpo de bomba. Mientras más comprimida en éste se ve el agua, mejor aprieta el cuero, aplicándolo por una parte sobre la pared del cuerpo de bomba y por otra sobre el émbolo C.

Fig. 92.

3°. *Funcionamiento.* — La presión que se puede obtener con la prensa hidráulica depende de la relación de la sección del émbolo C á la del émbolo *a*. Si la primera es 100 veces mayor que la segunda, la presión soportada de abajo arriba por el émbolo grande será 100 veces la ejercida por el pequeño. Además, se gana fuerza todavía por mediación de la palanca O. Por ejemplo, si el brazo de palanca de la potencia es igual á 5 veces el de la resistencia, se quintuplicará el esfuerzo aplicado al émbolo pequeño ; un esfuerzo de 30 kilogramos en la palanca, corresponderá, pues, en el émbolo C á una presión de 15000 kilogramos.

Observemos, por lo demás, que mientras más fuerza se gana, más lenta es la marcha del émbolo grande respecto de la del pequeño : es decir que *lo que se gana en fuerza se pierde en velocidad.* Este es, efectivamente, un principio general de mecánica, cuya aplicación se observa en todas las máquinas.

4°. *Usos.* — La prensa hidráulica se utiliza en todos los trabajos que exigen grandes presiones, como el batanado de los paños, la extrac-

ción del zumo de la remolacha y del aceite de las semillas oleaginosas. También sirve para probar las calderas de vapor y las cadenas destinadas á la marina, etc.

100. **Prensas de Desgoffe y de Cailletet.** — M. Desgoffe ha introducido en la construcción de la prensa hidráulica dos perfeccionamientos notables.

1°. Es posible inyectar directamente agua debajo del émbolo mayor, de modo que resulten aumentos de presión bruscos.

2°. Cuando se ha alcanzado el límite de presión, es posible rebasarlo, por medio de un émbolo zambullidor, que se introduce más ó menos profundamente en el cuerpo de bomba y que se maneja desde fuera, con ayuda de una gran rueda de manubrios.

Los mismos perfeccionamientos existen en el aparato de M. Cailletet para la liquefacción de los gases llamados permanentes.

CAPÍTULO II

PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS GRAVES EN EQUILIBRIO.

PRESIONES SOBRE LAS PAREDES DE LOS VASOS. — PRESIONES SOBRE LOS CUERPOS SUMERGIDOS. — CONDICIONES DE EQUILIBRIO DE LOS LÍQUIDOS GRAVES.

101. **Existencia de las presiones en los líquidos graves en equilibrio.** — Los líquidos son *graves* ó *pesados* como todos los demás cuerpos; es decir, están sometidos á la acción de la gravedad en la superficie de la tierra. En hidrostática se les llama sobre todo así cuando se considera que no actúa sobre ellos más fuerza exterior que la atracción de nuestro globo. En un líquido grave en equilibrio, el peso solo de las moléculas basta para desarrollar presiones que se transmiten y se ejercen en todos sentidos, sea dentro de la masa, sea sobre las paredes del vaso, y siempre normalmente á la superficie de presión. La existencia de estas presiones se prueba fácilmente por la experiencia.

Presión vertical de arriba abajo. — La presión vertical de arriba abajo resulta directamente del peso de las moléculas líquidas acumuladas. Para ponerla de manifiesto, basta verter un líquido cualquiera en un vaso cilíndrico de vidrio, cerrado por un fondo horizontal móvil, que podría ser, pongamos por ejemplo, una válvula que se abriera de arriba abajo. Desde que la cantidad de líquido vertida sea suficiente se ve que la válvula cede á la presión.

Empuje. — Experiencia del obturador. — La presión que las capas superiores de un líquido ejercen sobre las inferiores provoca en éstas *una reacción vertical de abajo arriba,* que es una consecuencia del

principio de Pascal. Esta presión constituye el *empuje de los líquidos.* Es muy sensible cuando se introduce la mano en un líquido, sobre todo si es muy denso, como el mercurio. Se la puede probar y medir valiéndose por el *experimento del obturador.*

Compónese el aparato de un ancho tubo de vidrio A, abierto en sus dos extremidades (fig. 93). El borde inferior se puede cerrar herméticamente aplicando contra él, sea un disco de vidrio pulimentado O, que constituye el *obturador*, sea una tarjeta fina, de peso despreciable. Introdúcese el aparato en el agua, sosteniendo el obturador con un hilo atado en su centro, y se suelta el hilo así que la inmersión es bastante profunda. Entonces el obturador permanece aplicado contra el tubo, lo cual indica que soporta una presión de abajo arriba superior á su peso. Podría valorarse aproximadamente esta presión, sea vertiendo con lentitud agua sobre el obturador, sea cargándolo de pesos marcados, hasta que se separe del tubo.

Fig. 93.

Presiones oblicuas. — Se probaría de la misma manera la existencia de presiones oblicuas ó verticales, aplicando el obturador contra tubos cuyo borde inferior estuviera orientado y redondeado según direcciones cualesquiera.

102. **Teorema fundamental.** — La transmisión de estas presiones en los líquidos graves en equilibrio se efectúa con arreglo á la ley siguiente :

La diferencia de las presiones en dos puntos cualesquiera de un líquido grave en equilibrio es igual al peso de un cilindro del líquido, que tenga por base la unidad de superficie, y como altura la distancia vertical entre esos dos puntos.

Esta ley es la base de la teoría del equilibrio de los líquidos graves. Puede considerársela, sea como un principio análogo al de Pascal, es decir, admitirlo *a priori* y comprobarlo en sus consecuencias, sea como un teorema de mecánica y demostrarlo mediante el razonamiento. Procederemos sucesivamente de ambos modos.

103. **Demostración del teorema fundamental.** — Sean A y A' los dos puntos, l su distancia y h su distancia vertical, ω y ω' las presiones (definidas como antes), y d el peso de la unidad de volumen del líquido.

Tomemos alrededor de los puntos A y A', en direcciones cualesquiera, *láminas ó capas elementales* del líquido. Como están en equilibrio, podemos solidificarlas con el pensamiento (fig. 94). Sea ω la superficie del elemento A. Imaginemos un cilindro que tenga por base este elemento y sus generatrices paralelas á A A' : este cilindro cortará una superficie ω' en el elemento A'. De esta manera tenemos un filete cilíndrico extremadamente pequeño, cuyo volumen es, según se sabe, igual á σl, siendo σ la sección recta y l la distancia entre los centros de gravedad de las bases, distancia que puede confundirse con la A A'.

Hallándose en equilibrio este filete líquido, podemos solidificarlo igualmente

por el pensamiento. Entonces todo ocurre como si se tratara de un cuerpo sólido en equilibrio bajo la acción de un sistema cualquiera de fuerzas, que son su peso y las presiones diversas que en su superficie ejerce el líquido ambiente. Demuéstrase en mecánica que en el caso general hay seis condiciones de equilibrio: para las exigencias de la demostración nos bastará aquí una sola. Sentaremos que si se proyectan todas las fuerzas del sistema sobre una recta cualquiera, por ejemplo sobre el eje A A' del cilindro, *la suma algébrica de estas proyecciones debe ser nula.*

Ahora bien, estas fuerzas son:

1°. El peso P del filete, aplicado en su centro de gravedad G, y que forma un ángulo β con el eje de figura. Es igual á σld, ó á $\frac{\sigma hd}{\cos\beta}$ si se observa que $l = \frac{h}{\cos\beta}$;

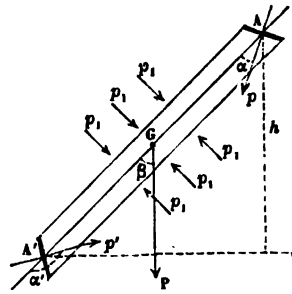


Fig. 94.

2°. La presión elemental p, que forma un ángulo α con AA'; es igual á $\omega\omega$, ó á $\frac{\omega\sigma}{\cos\alpha}$, si se observa que $\omega = \frac{\sigma}{\cos\alpha}$;

3°. La presión elemental p, que forma un ángulo α' con AA'; es igual á $\omega'\omega'$, ó á $\frac{\omega'\sigma}{\cos(180^0 - \alpha')}$, porque $\omega' = \frac{\sigma}{\cos(180^0 - \alpha')}$;

4°. Las presiones laterales, p_1...., p_n, que son normales á la superficie del cilindro, y por consiguiente perpendiculares al eje.

Para obtener las proyecciones de todas estas fuerzas, basta multiplicar cada una de ellas por el coseno del ángulo que forma con la dirección AA';

De este modo se obtiene la ecuación de equilibrio

$$P\cos\beta + p\cos\alpha + p'\cos\alpha' = 0.$$

Siendo agudos los ángulos β y α, el ángulo α' es obtuso; su coseno es pues negativo. Pongamos en evidencia este signo, reemplazando cos α' por el coseno del suplemento. Tiénese

$$\cos\alpha' = -\cos(180^0 - \alpha')$$

y la ecuación se convierte, haciendo pasar los dos últimos términos al segundo miembro, en

$$p'\cos(180^0 - \alpha') - p\cos\alpha = P\cos\beta.$$

Reemplazando p', p y P por sus valores, dados anteriormente, y suprimiendo los factores comunes, resulta

$$\omega' - \omega = hd.$$

que es lo que se trataba de demostrar

Observación. — Las presiones ejercidas por los líquidos graves y sus condiciones de equilibrio pueden deducirse en todos los casos como corolarios del teorema fundamental.

104. Condiciones de equilibrio de un líquido grave. — Citemos como ejemplo las condiciones de equilibrio de un líquido grave.

Hay dos, una enteramente general y la otra particular al caso en que el líquido presenta una superficie libre (Llámase *superficie libre* de un líquido á su superficie terminal en el aire ó en el vacío).

1°. *La presión debe ser idéntica en todos los puntos de un mismo plano horizontal, tomado á cualquier nivel en el líquido.*

2°. *La superficie libre del líquido debe ser plana y horizontal.*

En efecto, sean p y p' las presiones en dos puntos cualesquiera de un mismo plano horizontal. Entre p y p' se tiene la relación $p' = p + zd$; y como $z = 0$, $p' = p$.

Recíprocamente, si las presiones p y p' son iguales en dos puntos cualesquiera de una superficie, tomada en un líquido grave, la relación general, que puede escribirse $zd = p' - p$, se reduce á $zd = 0$. Como d no es nulo, dedúcese de ahí que $z = 0$; luego los puntos se encuentram en un mismo plano horizontal.

Ahora bien, la superficie libre soporta necesariamente en todos sus puntos la misma presión : luego forma un plano horizontal.

PRESIONES SOBRE LAS PAREDES DE LOS VASOS.

105. **Presiones sobre el fondo plano y horizontal de un vaso.** — Teorema. — En un *líquido grave en equilibrio, las presiones sobre el fondo plano y horizontal del vaso tienen una resultante única, vertical y dirigida de arriba abajo, igual al peso de un cilindro del líquido que tenga por base el fondo y por altura su distancia á la superficie libre. Se aplica en el centro de gravedad de la superficie del fondo.*

La proposición no es rigorosamente exacta más que en el caso del vacío. En el ordinario, cuando el líquido está en el aire ó en un gas, su superficie libre soporta una presión. Entonces hay que agregar al peso del cilindro líquido la presión ejercida por el gas sobre una porción de la superficie libre igual al fondo del vaso.

Demostración. — Sea AB el fondo plano y horizontal ; sea MN la superficie libre. En cada uno de los elementos de superficie, tales como σ, se ejerce una presión elemental p. Como éstas presiones todas son verticales, tienen una resultante igual á su suma y aplicada en el centro de las fuerzas paralelas de AB (fig. 95). Ahora bien, en un punto del elemento, la presión ω es igual á $\omega + hd$, siendo ω' la presión que la atmósfera ejerce en un punto de la superficie libre y h la distancia de este nivel al fondo. Tiénese pues

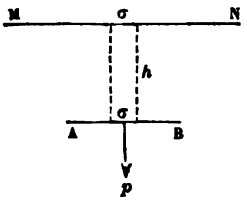


Fig. 95.

$$p = \omega' \sigma + \sigma h d$$

y

$$P = \Sigma (p) = \Sigma \omega' \sigma + \Sigma h d \sigma = \omega' \Sigma \sigma + h d \Sigma \sigma ;$$

$\Sigma (\sigma)$ es igual á la superficie S del fondo. Por fin resulta

$$P = S\omega' + Shd.$$

El término $S\omega'$ representa la presión de la atmósfera sobre una superficie igual á la del fondo. *Como esta presión se ejerce igualmente en todos sentidos sobre las paredes exteriores del vaso, la despreciaremos.* Queda pues

$$P = Shd.$$

según era necesario demostrar.

106. **Comprobación experimental.** — La presión sobre el fondo

de un vaso depende pues de la magnitud de ese fondo, así como de la profundidad y densidad del líquido; pero es independiente *de la cantidad de líquido y de la forma del vaso*. Esta consecuencia se demuestra experimentalmente valiéndose de varios aparatos.

1°. *Aparato de Haldat.* — Este antiguo aparato de gabinete se compone de un tubo acodillado ABC (fig. 96), que termina en una llave de cobre A, donde se atornillan sucesivamente dos vasos M y P, de análoga altura, pero de forma y capacidad diferentes. Para efectuar el experimento se empieza por echar mercurio en el tubo ABC, de manera que su nivel no llegue enteramente á la llave A. Entonces se atornilla en la llave el vaso M, llenándolo de agua; ésta impulsa por su peso al mercurio, que sube en el tubo C, donde se marca su nivel con un anillito *a*, que puede correr á lo largo del tubo. Márcase también el nivel del

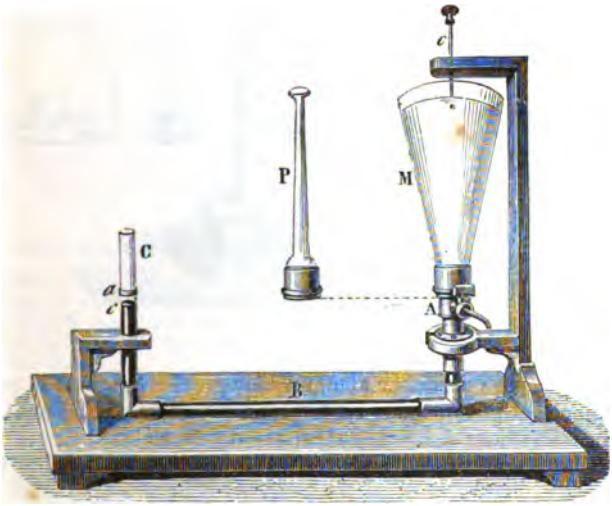


Fig. 96.

agua en el vaso M con una varilla móvil *o* dispuesta encima. Hecho esto se vacía el vaso M por medio de una llave, se le destornilla y se le reemplaza por el vaso P. Si se vierte agua en éste, el mercurio, que había recobrado su nivel en las dos ramas del tubo ABC, se eleva de nuevo en C, y cuando en el vaso P el agua alcanza de nuevo la extremidad de la varilla *o*, el mercurio sube también en el tubo C hasta la marca *a*. De ahí se deduce que la presión transmitida al fondo móvil constituído por la superficie libre del mercurio en el tubo A, es igual en ambos casos. De modo que esta presión es independiente de la forma del vaso y de la cantidad de líquido.

2°. *Aparato de Masson.* — En el aparato de Masson (fig. 97), la presión del agua contenida en el vaso M no se ejerce ya, como precedentemente sobre una columna de mercurio, sino en un disco obturador *a*, que cierra un gollete *c*, donde está atornillado el vaso M. Este disco no se encuentra fijo al gollete, sino únicamente colgando de un hilo atado en la extremidad del fiel de una balanza. En la

otra punta hay un platillo donde se ponen pesos hasta que equilibren la presión ejercida por el agua sobre el obturador. Vaciando entonces el vaso M, se le destornilla y se pone en lugar suyo el tubo estrecho P. Llenando este tubo de agua hasta la misma altura que anteriormente, lo que se sabe por medio del punto de referencia *o*, se

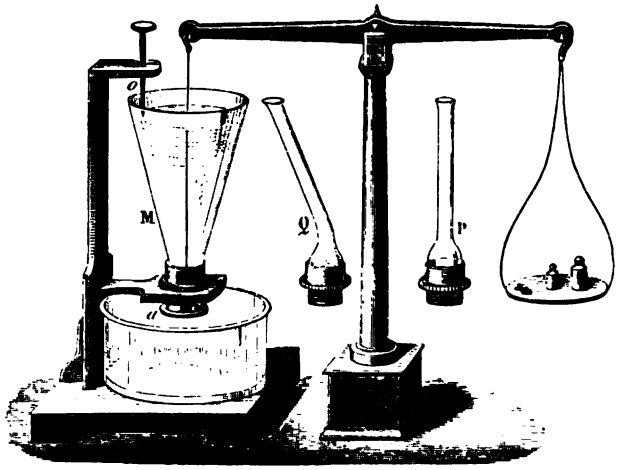


Fig. 97.

observa que para sostener al obturador precisa echar en el platillo exactamente el mismo número de pesos que antes. Esto lleva á conclusiones idénticas á las del experimento de Haldat. El resultado será análogo si en vez del tubo vertical P se atornilla en el gollete *c* el tubo oblicuo Q.

107. **Consecuencias.** — 1°. *Tonel de Pascal.* — De los dos experimentos anteriores resulta que con pequeñas cantidades de líquido pueden obtenerse presiones considerables. Para ello basta fijar en la pared de un vaso cerrado y lleno de agua uu tubo de pequeño diámetro y gran altura. Hallándose lleno de agua este tubo, la presión transmitida sobre la pared del vaso es igual al peso de una columna de agua que tuviera por base esta pared y altura igual á la del tubo. Pascal logró de esta manera, valiéndose de un sencillo hilito de agua de 10 metros de altura, hacer reventar un tonel sólidamente construido. Por eso se llama á este experimento *experiencia de Pascal.*

2°. *Presión en el fondo de los mares.* — Conforme á esta doctrina, pueden calcularse las presiones que se producen en el fondo de los mares. La unidad de medida usada es la presión de la atmósfera, que equivale, para una superficie dada, al peso de un cilindro de agua pura que tenga como base esta superficie y próximamente $10^m,33$ de altura. Pues bien, los naturalistas que han explorado recientemente el fondo de los mares, á bordo del *Talismán* y del *Travailleur*, han observado que la sonda no tocaba la tierra á profundidades de 8000 y aun más metros. De modo que en el fondo de ciertos océanos se ejerce una presión superior á 800 veces la atmosférica.

108. **Presiones sobre una pared plana lateral.** — Teorema. — *En*

un líquido grave en equilibrio, las presiones ejercidas sobre una porción plana de pared lateral tienen una resultante que es normal á la pared é igual al peso de un cilindro del líquido que tenga como base la porción de pared considerada y como altura la distancia de su centro de gravedad á la superficie libre. Aplícase en un punto que se llama centro de presión.

Demostración. — Llevemos un plano vertical perpendicularmente á la pared y tomémosle como plano de figura. Sean MN y AB las secciones de la superficie libre y de la porción plana de pared (fig. 98).

Sobre cada elemento de superficie, tales como ω, se ejerce una presión elemental p, que le es normal. Siendo paralelas todas estas fuerzas, tienen una resultante única, que les es paralela, igual á la suma, y aplicada en el centro de este sistema de fuerzas paralelas. Tiénese pues

$$P = \Sigma (p).$$

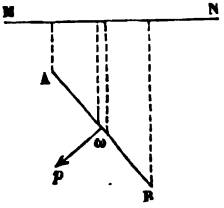


Fig. 98.

Ahora bien, en un punto del elemento, la presión ω está dada por la ecuación fundamental $\omega = \omega' + hd$, siendo ω' la presión ejercida en un punto cualquiera de la superficie libre. Desdeñando esta última presión, se tiene

$$\omega = hd \quad \text{y} \quad p = \omega hd;$$

luego

$$P = \Sigma (\omega hd). \qquad P = d \Sigma (\omega h).$$

Es posible deducir del *teorema general de los momentos*[1] un medio muy sencillo de calcular la suma de los productos tales como ωh. En efecto, observemos primero que si se multiplica cada uno de estos términos por S, peso específico de la unidad de superficie de la pared, toda la suma quedará multiplicada á su vez por δ y se tendrá

$$\Sigma (\omega h \delta) = \delta \Sigma (\omega h).$$

Ahora bien, $\omega\delta$ es el *peso* del elemento de pared ω, y siendo h la distancia de su punto de aplicación (que es un punto cualquiera del elemento) al plano de la superficie libre, el producto $\omega h \delta$ es el *momento de la fuerza* ωd respecto *del plano* MN. La suma $\Sigma (\omega h \delta)$ es pues la suma de los momentos de los pesos de los diversos elementos de la porción de pared. Según el teorema de los momentos, esta suma es igual al de la resultante, quiere decir, al momento del peso total de la porción de pared. Sea S la superficie total de esta porción, su peso es $S\delta$; sea H la distancia del centro de gravedad á la superficie libre: el momento del peso total es $SH\delta$. Tiénese, en consecuencia

$$\Sigma (\omega h \delta) = SH\delta, \quad \text{de donde} \quad \delta \Sigma (\omega h) = SH\delta \quad \text{y} \quad \Sigma (\omega h) = SH.$$

Sustituyendo este valor, resulta $P = SH\delta$.

109. **Centro de presión.** — El centro de presión es *el punto de aplicación de la presión total sobre la porción de pared considerada.* Distínguese necesariamente del *centro de gravedad* de esta pared, que es el punto de aplicación del peso total de su superficie, supuesta grave.

En efecto, los pesos de los elementos de la pared son simplemente proporcionales á estos elementos, mientras que las presiones sobre esos mismos elementos son proporcionales á los productos de cada elemento por su distancia á la superficie libre. Ahora bien, á medida que se penetra en el líquido, el peso del elemento de pared permanece constante, mientras que la presión elemental aumenta proporcionalmente á h. De ahí resulta que el centro de presión debe encontrarse *por debajo* del centro de gravedad.

1. Véase una *Mecánica*, por ejemplo la de Combette publicada por nuestra casa.

La determinación del centro de presión es un problema de mecánica, análogo á la determinación del centro de gravedad de una superficie.

Ejemplo. — *Caso de un rectángulo sumergido.* — Sea H'HN la sección del vaso y del líquido por el plano vertical de simetría del rectángulo (fig. 99). Según lo que precede, el volumen líquido, cuyo peso representa la presión, es un tronco de prisma que tiene como sección meridiana el trapecio MM_1N_1N. Puede dividirsele en dos volúmenes, por medio de un plano M_1K, paralelo á la pared. Uno de estos volúmenes es un paralelepípedo rectángulo que tiene como sección M_1MNK y su centro de gravedad en G_2, centro de OO'. La otra parte es un prisma triangular que tiene su centro de gravedad en G_1, á la tercera parte de la mediana N_1O'. Como el peso del volumen total es la resultante de los pesos de estos dos volúmenes parciales, el centro de gravedad del volumen total se encuentra situado en la línea G_2G_1, entre los dos puntos G_1 y G_2, y la proyección de este punto sobre la pared será el *centro de presión.*

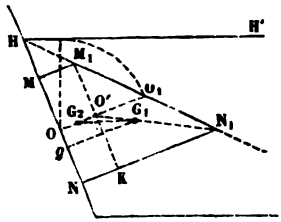


Fig. 99.

Se ve que este punto estará necesariamente por debajo del punto O, centro de gravedad del rectángulo, y es además fácil comprender que *si la porción de pared penetra en el líquido, su centro de presión sube hacia su centro de gravedad, aunque permaneciendo por debajo de este punto.*

110. Presiones sobre el conjunto de las paredes de un vaso. — Teorema. — *En un líquido grave en equilibrio, todas las presiones ejercidas sobre el conjunto de las paredes del vaso que lo contiene, sea cual fuere su forma, tienen una resultante única, dirigida de arriba abajo, é igual al peso total del líquido.*

Este teorema es un corolario del fundamental, lo mismo que los precedentes. Se le puede demostrar de dos maneras, sintética y analíticamente.

Demostración sintética. — Sea un líquido grave en equilibrio en un vaso que lo contiene. El líquido y el conjunto de las paredes del vaso constituyen un sistema material en equilibrio bajo la influencia de dos sistemas de fuerzas opuestas : por una parte, los pesos de las moléculas líquidas, que tienen una resultante única igual al peso total del líquido ; por otra parte las resistencias ó reacciones, f, f', f'', que los elementos de pared oponen á los elementos líquidos yuxtapuestos. Como este último sistema equilibra al primero, tiene necesariamente una resultante única, igual y opuesta al peso total del líquido. Ahora bien, estas reacciones elementales de las paredes son iguales y opuestas, una por una, á las presiones elementales p, p', p'' del líquido sobre la pared ; luego este último sistema tiene también una resultante única precisamente igual al peso total de los líquidos y dirigida en el mismo sentido.

Demostración analítica. — Consiste en considerar las presiones elementales p, p'... del líquido sobre las paredes como un sistema de fuerzas cualesquiera aplicadas á un cuerpo sólido, y en buscar la resultante por el método general.

Sea un vaso de forma cualquiera (fig. 100), HH' la superficie libre del líquido, Ox, Oy, Oz tres ejes de coordenadas rectangulares cualesquiera. Sea un elemento ω tomado en torno de un punto M de la pared. Sean p la presión en el punto M y α, β, γ los ángulos que forma con los tres ejes. Aplicando la regla del paralelepípedo de las fuerzas, se descompone p en tres componentes, que tienen por intensidades respectivas $p \cos \alpha$, $p \cos \beta$ y $p \cos \gamma$ (fig. 101). Efectuando la descomposición sobre cada una de las fuerzas p, se tienen tres sistemas de fuerzas respectivamente paralelas á cada uno de los ejes coordenados. Cada

uno de ellos tiene una resultante igual á la suma. Estas tres resultantes parciales son

$$X = \Sigma (p \cos \alpha), \quad Y = \Sigma (p \cos \beta), \quad Z = \Sigma (p \cos \gamma).$$

Analicemos los términos que constituyen cada una de estas sumas.

Imaginemos un filete cilíndrico paralelo á Ox y circunscrito al elemento ω (fig. 101) : ese filete cortará en la parte opuesta de la pared un elemento ω'. Sean p' la presión sobre este último elemento y α' β', γ los ángulos que forma su dirección con los ejes. Á cada elemento ω de la pared corresponde análogamente un elemento ω', y *nada más que uno*. Es, pues, posible agrupar todos los términos

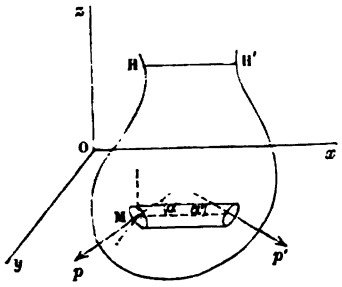


Fig. 100.

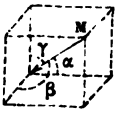


Fig. 101.

de la suma $\Sigma (p \cos \alpha)$ por pares de dos, correspondientes á un mismo filete paralelo á Ox y escribir

$$X = \Sigma (p \cos \alpha + p' \cos \alpha').$$

Pero se tiene evidentemente

$$p = \pi\omega \quad \text{y} \quad p' = \pi\omega'.$$

Si trazamos dos planos perpendiculares al eje en PQ y en P' Q', tenemos dos secciones rectas del cilindro que son iguales (fig. 102). Sea σ la magnitud de la sección recta, siendo PQ la proyección de ω, se tiene

$$PQ \text{ ó } \sigma = \omega \cos (180^\circ - \alpha) = -\omega \cos \alpha.$$

También se tiene análogamente

$$P'Q' \text{ ó } \sigma' = \omega' \cos \alpha'.$$

Resulta pues

$$\sigma = \omega' \cos \alpha' = -\omega \cos \alpha.$$

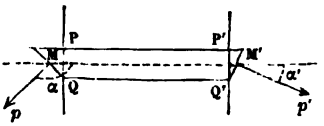


Fig. 102.

Sustituyendo estos valores en la suma X, resulta, una vez hechas todas las reducciones,

$$X = \Sigma (\pi\sigma - \pi\sigma) = 0.$$

De la misma manera se demostrará que Y es idénticamente nulo.

El mismo método de razonamiento puede aplicarse á la evaluación de la suma Z. Así se llegará á una suma de binomios tales como $p \cos \gamma + p' \cos \gamma'$.

Pero como aquí los puntos M y M' no se encuentran ya en el mismo plano horizontal, se tendrá

$$\pi' = \pi + zd,$$

por consiguiente

$$p' = \pi'\omega' = \pi\omega' + \omega' zd$$

y

$$Z = \Sigma \pi' (\omega \cos \gamma - \omega' \cos \gamma') + \Sigma \omega zd \cos \gamma.$$

El primer término es idénticamente nulo, como los términos análogos de las restantes sumas. El segundo representa la suma de los pesos de los filetes cilíndricos verticales, en los cuales se puede depositar el volumen total del

líquido : esta suma es evidentemente igual *al peso total del líquido*, que es lo que nos proponíamos demostrar.

111. **Paradoja hidrostática.** — Este último teorema refuta directamente la proposición errónea conocida por el nombre de *paradoja hidrostática*.

Si se tienen tres vasos, A, B, C (fig. 103), de análogo fondo, pero de forma y capacidad diferentes, llenos de agua hasta la misma altura, la opinión general — que por lo demás está conforme con la verdad — es que se necesitarán pesos diferentes para equilibrarlos sucesivamente en un mismo platillo de balanza. Pero se sabe que la

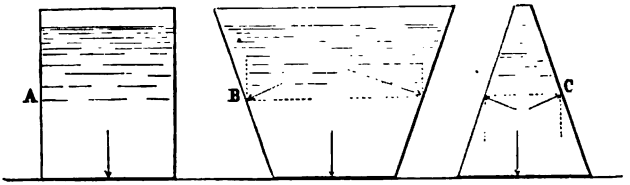


Fig. 103.

presión es la misma en el fondo de cada uno de estos vasos : parece resultar pues necesariamente de esto que colocando en uno de los platillos un peso conocido igual á esta presión, se equilibrarán sucesivamente los tres vasos colocados en el otro platillo. Esta consecuencia falsa de un principio verdadero es lo que constituye la paradoja.

El error consiste en razonar en este caso como si el fondo de cada vaso estuviera separado y fuera independiente de las paredes laterales; pero como estas paredes son solidarias, transmiten al platillo, no sólo la resultante parcial de las presiones ejercidas sobre el fondo, sino la resultante total de las presiones ejercidas sobre el conjunto, y hemos visto que *esta resultante es igual, en todos los casos, al peso total del líquido.*

En el caso del vaso cilíndrico A, la presión sobre el fondo es precisamente igual al peso total del líquido; en el vaso ensanchado B, la presión sobre el fondo es inferior al peso total, pero las presiones laterales tienden á aumentarlo; por fin, en el vaso cónico C la presión sobre el fondo es superior al peso total, pero las presiones laterales tienden á disminuirla.

112. **Vasos de reacción.** — *Torniquete hidráulico.* — Cuando se abre un orificio en la pared de un vaso que contiene un líquido grave en equilibrio, á la vez que el líquido sale del vaso tiende éste á moverse *en sentido contrario de la salida.* Si el vaso está dispuesto de modo que obedezca fácilmente á esta impulsión, se tiene lo que llamamos un *vaso de reacción.* El tipo de estos aparatos es el *torniquete hidráulico.*

Compónese de un vaso de vidrio M (fig. 104), que gira libremente en torno de un eje vertical. Este vaso lleva en su parte inferior, perpendicularmente á su eje, un tubo de cobre C, acodillado horizontalmente y en sentidos contrarios en sus dos extremidades. Lleno de agua el aparato, permanece inmóvil todo el tiempo que están cerrados los orificios del tubo acodillado. Pero apenas se abren éstos, el líquido sale y el aparato toma movimiento de rotación en sentido contrario al de la salida. Este movimiento es tanto más rápido cuanto mayor es la altura del líquido en el vaso M y cuanta más superficie presenta la sección de los orificios de salida.

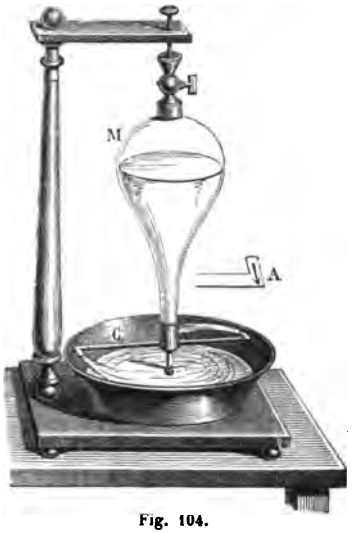


Fig. 104.

Péndulo hidráulico. — También se puede citar como experiencia de curso el *péndulo hidráulico*, aparatito formado por una esfera de gollete lateral, llena de agua y colgada, como un péndulo, de la extremidad de un hilo. Apenas se destapa el orificio, el líquido sale, y el péndulo, separándose de la vertical en sentido contrario al de salida, se pone á oscilar.

También se emplea una *carretilla* muy móvil.

Ruedas de reacción. — Las presiones laterales se utilizan en los motores hidráulicos conocidos por el nombre de *ruedas de reacción.*

Teoría de los vasos de reacción. — Es preciso darse cuenta al mismo tiempo del movimiento del líquido y del vaso. En ambos casos basta aplicar el principio de mecánica siguiente :

Cuando un sistema de fuerzas se equilibra á sí mismo en un cuerpo sólido, una cualquiera de ellas es igual y opuesta á la resultante de todas las demás.

Sea un líquido en equilibrio en un vaso cualquiera (fig. 105). Puede suprimirse

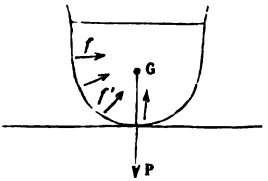


Fig. 105.

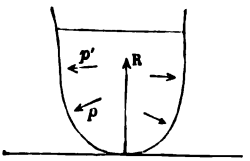


Fig. 106.

el vaso por el pensamiento ; con tal de solidificar de la misma manera el líquido y de aplicar á sus diversos elementos las fuerzas de resistencia ó reacciones

f, f', f'',.. que los elementos de pared les oponen. De este modo se tiene un sistema de fuerzas, compuesto del peso total P del líquido y de las reacciones f, f'..., que se equilibran. Como una cualquiera de ellas, por ejemplo f, es igual y opuesta á la resultante de las otras, si se llega á suprimirla, — lo cual se hace abriendo un orificio en la pared en este punto, — la resultante de todas las demás cesará de estar contrabalanceada y precipitará al líquido por este orificio.

Cuanto al vaso lleno de líquido, se le puede considerar como un cuerpo sólido sometido al sistema de fuerzas siguiente : 1°. las presiones p, p'... del líquido sobre las paredes, presiones que tienen una resultante única igual al peso total del líquido; 2°. el peso de las mismas paredes; 3°. la reacción R del plano que sostiene el vaso ó del hilo de que cuelga y que equilibra á las otras dos (fig. 106). Si se practica un orificio frente á una de las presiones p, el líquido sale, la presión p deja de ejercerse y la resultante de todas las demás fuerzas, que es igual y opuesta á p, tiende á arrastrar el vaso en sentido contrario de la salida.

PRESIONES SOBRE LOS CUERPOS SUMERGIDOS.

113. **Principio de Arquimedes.** — 1°. Enunciado. — *Cuando un cuerpo sólido está enteramente sumergido en un líquido grave en equilibrio, las presiones que se ejercen en su superficie tienen una resultante única, igual y directamente opuesta al peso del volumen líquido desalojado, y que se aplica en el centro de gravedad de este volumen.*

Esta resultante se llama el *empuje* del líquido; su punto de aplicación es el *centro de empuje.*

Arquímedes, de Siracusa, descubrió esta ley, que se enuncia también de la manera siguiente :

Todo cuerpo sumergido en un líquido grave en equilibrio sufre en él un empuje vertical de abajo arriba, igual al peso del volumen líquido desalojado.

2°. Demostración. — Puede demostrarse este principio de dos maneras, teórica y experimentalmente.

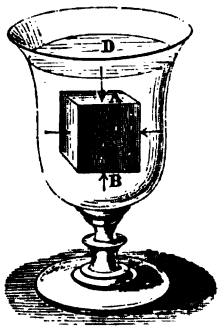


Fig. 107.

Demostración a priori. — Consideremos en una masa líquida en equilibrio una porción de líquido de forma cualquiera, esférica, ovoide ó irregular y supongámosla solidificada, sin aumento ni disminución de volumen (fig. 107). Es evidente que la parte solidificada de este modo soportará, de parte de la masa líquida, las mismas presiones que antes y que, por consiguiente, seguirá estando en equilibrio, lo que no puede ocurrir sino porque soporta, de abajo arriba, un empuje igual á su peso. Ahora bien, si en lugar de la parte solidificada se imagina un cuerpo de otra sustancia, del mismo volumen y de análoga forma, soportará necesariamente las mismas presiones que soportaba el líquido solidificado, y en consecuencia estará sometido también él á un empuje igual al peso del líquido desalojado.

Demostracion experimental. — Se efectúa generalmente por medio de la *balanza hidrostática.* Esta es una balanza ordinaria cada uno de cuyos platillos está provisto de un garfio, y cuyo fiel puede elevarse y bajarse á voluntad, por medio de una barra dentada que se pone en

movimiento con el pequeño piñón C (fig. 108). Un diente D mantiene la barra dentada cuando se la levanta. Subido el fiel, se cuelga de uno de los platillos un cilindro hueco A, de latón, y de éste á su vez otro macizo B, cuyo volumen es exactamente igual á la cabida del primero; después se colocan pesos en el otro platillo hasta

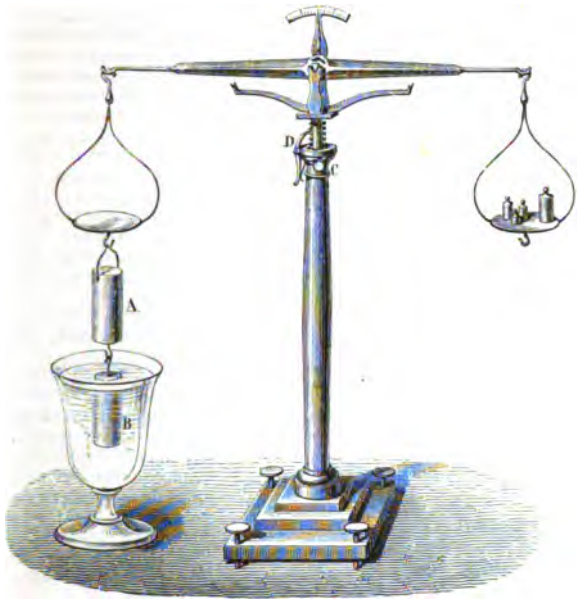


Fig. 108.

restablecer el equilibrio. Si entonces se llena de agua el cilindro A, el equilibrio se rompe; pero si se baja al mismo tiempo el fiel de manera que el cilindro B penetre enteramente en el agua de un vaso colocado debajo, se ve que el equilibrio se restablece. De modo iue el cilindro B experimenta por efecto de su inmersión un empuje qgual al peso del agua vertida en el cilindro A.

Resulta, pues, que en este experimento ocurre todo, en lo relativo al equilibrio del fiel, como si el cilindro macizo *perdiera de repente una parte de su peso* en el momento de su inmersión. Esta es la razón de que algunas veces se enuncie el principio en la forma siguiente que es incorrecta : *Todo cuerpo sumergido en un líquido pierde una parte de su peso igual al peso del líquido que desaloja.*

Observación. — En vez de una balanza hidrostática se recurre con frecuencia á una balanza ordinaria de platillos provista de garfios. La inmersión del cilindro macizo se obtiene entonces por medio de un montante de cremallera (fig. 123).

114. **Recíproca del principio de Arquímedes.** — 1°. Enunciado. — *Todo cuerpo sumergido en un líquido grave en equilibrio ejerce sobre este líquido una presión vertical de arriba abajo, igual al peso del volumen líquido desalojado.*

Puede enunciársele de otra manera menos correcta pero más expresiva: *El peso perdido por el cuerpo sumergido pasa al líquido ambiente.*

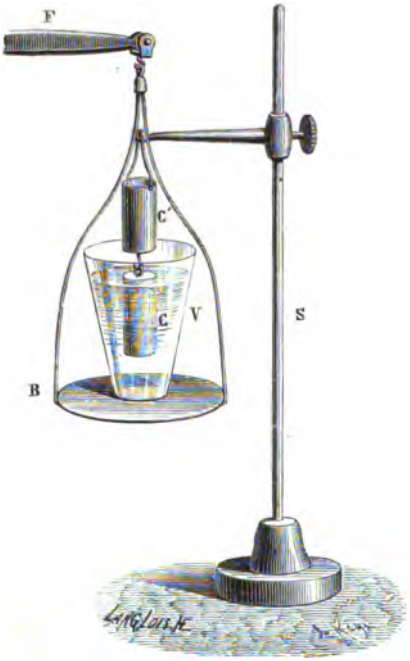


Fig. 109.

2°. Demostración. — *Comprobación experimental.* — Basta modificar ligeramente la experiencia precedente. Colócase el vaso lleno de agua en un platillo de la balanza y se hace la tara en el otro. El sistema de los dos cilindros, dispuestos como anteriormente, el macizo debajo del hueco, se cuelga de un montante fijo (fig. 109). Levántase el fiel de la balanza de modo que el cilindro macizo penetre en el líquido. Apenas comienza a inmersión, queda destruido el equilibrio. Así que la inmersión termina, se vierte en el cilindro hueco agua tomada del vaso, y se observa que, apenas está lleno el cilindro, se restablece por entero el equilibrio.

Demostración a priori. — La explicación teórica de este hecho es muy sencilla. Ó bien puede considerársele como una consecuencia del principio general de la igualdad de la acción y de la reacción: si el cuerpo sumergido experimenta un empuje de parte del líquido ambiente, éste debe sufrir por parte del cuerpo una reacción igual y contraria. Ó bien se puede observar simplemente que, cuando se sumerge un cuerpo en un líquido, se eleva el nivel en el vaso; la resultante de las presiones sobre las paredes aumenta pues la misma cantidad que si se hubiera añadido al líquido un volumen igual al volumen desalojado: este aumento de la presión resultante es evidentemente igual al peso del volumen desalojado

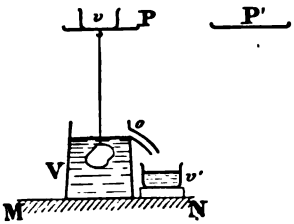


Fig. 110.

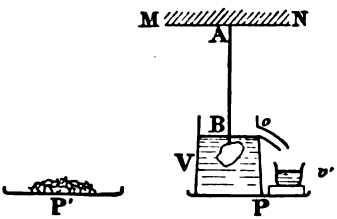


Fig. 111.

115. **Demostración sencilla del principio de Arquímedes: experimento de M. Boudréaux.** — Un vaso grande V (fig. 110), provisto de un orificio de salida para el

líquido en exceso y dos vasos pequeños v y v' idénticos, una balanza sencilla de garfios y un sostén de cremallera MN, bastan á M. Boudréaux para demostrar estas proposiciones con más exactitud.

El cuerpo se suspende del platillo P y se equilibra, estando uno de los vasos v en el mismo platillo. Sumérgese el cuerpo, que expulsa un volumen de agua igual al suyo propio, líquido que es recogido en el vaso v' : el platillo P sube por efecto del empuje. Sustituyendo el vaso v por el v' se restablece el equilibrio, lo cual demuestra evidentemente el principio.

Para demostrar la recíproca, se tara el vaso v lleno de líquido y el vaso v' en seco, sumergiendo después el cuerpo (fig. 111). El platillo P baja al mismo tiempo que el vaso v' recibe un volumen del líquido igual al del cuerpo. Para restablecer el equilibrio, basta con vaciar el vaso v' y ponerlo de nuevo en su sitio : la demostración es evidente.

116. Determinación del volumen de un cuerpo. — El volumen de un cuerpo proporciona medios de obtener con precisión el volumen de un cuerpo, por irregular que sea su forma, cuando no es soluble en el agua ó no absorbe este líquido. Para ello se cuelga con un hilo de la balanza hidrostática y se le pesa, primero en el aire y después en el agua pura. La pérdida de peso representa el peso y también el volumen del agua desalojada y, por consiguiente, el volumen del cuerpo sumergido. Si la pérdida de peso es, por ejemplo, de 155 gramos-peso, el volumen del cuerpo sumergido es de 155 centímetros cúbicos.

Observación. — No estando generalmente el agua á 4°, habrá una pequeña corrección que hacer, pues el volumen de dicho líquido á $t°$ no sigue siendo expresado por el mismo número que su peso [1].

117. Equilibrio de los cuerpos sumergidos y de los cuerpos flotantes. — Según el principio de Arquímedes, todo cuerpo sumergido en el líquido está sometido á dos fuerzas verticales y de sentidos contrarios : su peso P, aplicado en su centro de gravedad g y el em-

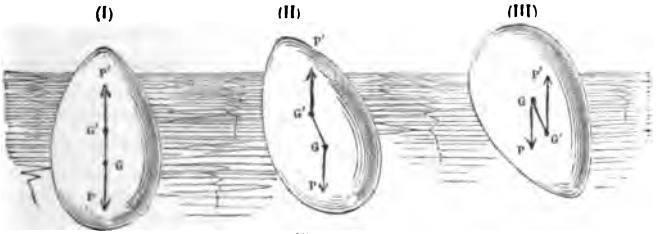


Fig. 112.

puje P' aplicado en el centro de empuje c (fig. 112). Si el sólido y el líquido son cuerpos homogéneos, los centros de gravedad del volumen común que ocupan en el espacio coinciden necesariamente. Los puntos g y c son uno mismo y las fuerzas P y P' están directamente opuestas. Si uno de los cuerpos no es homogéneo, lo cual ocurre

1. Véase § 126.

generalmente, sus puntos de aplicación g y c son distintos. Como las fuerzas P y P' son paralelas y de sentidos contrarios, tienen siempre una resultante igual á su diferencia (P — P'). Hay que considerar tres casos :

1°. $P - P' > 0$, de donde $P > P'$. *El peso del sólido es superior al empuje del líquido.* El cuerpo se va al fondo con movimiento uniformemente acelerado[1], impulsado por la fuerza constante (P — P'). Este caso se obtiene fácilmente echando un huevo en un vaso lleno de agua pura.

2°. $P - P' = 0$, de donde $P = P'$. *El peso es igual al empuje.* El cuerpo permanece en equilibrio en el líquido, con tal sin embargo de que esté orientado de manera que las dos fuerzas iguales sean directamente opuestas. Este caso se realiza poniendo un huevo en una mezcla de agua pura y de agua saturada de sal marina.

3°. $P - P' < 0$, de donde $P < P'$. *El empuje es superior al peso.* El cuerpo vuelve hacia la superficie libre, con movimiento uniformemente acelerado, impulsado por la fuerza constante (P' — P). Á partir del momento de la inmersión, el empuje decrece á la vez que el volumen del líquido desalojado disminuye. El cuerpo llega necesariamente á una posición en que $P' = P$. Debería permanecer en equilibrio en esta posición ; pero pasa de ella en virtud de la velocidad adquirida, volviendo á ella por causa de su peso y acabando por quedar fijo allí después de una serie de oscilaciones más ó menos numerosas. Entonces se dice que el cuerpo *flota ;* este es un *cuerpo flotante en equilibrio.* Realízase fácilmente este caso poniendo un huevo en agua saturada de sal marina. La cera, la madera, y todos los cuerpos más ligeros que el agua flotan en su superficie. Análogamente, una masa de hierro, que caería en seguida al fondo del agua, sobrenada en un baño de mercurio.

118. **Condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes. — Metacentro.** — Para que un cuerpo flotante permanezca en equilibrio, debe realizar dos condiciones :

1°. *El peso del líquido desalojado debe ser igual al peso del cuerpo ;*

2°. *El centro de gravedad del cuerpo y el centro de empuje del líquido deben encontrarse en la misma vertical.*

Efectivamente satisfechas estas dos condiciones, el peso del cuerpo aplicado en su centro de gravedad y el empuje de abajo arriba aplicado en el centro de presión son dos fuerzas, no sólo iguales sino directamente opuestas : luego se equilibran (fig. 112, I). Por lo demás estas dos condiciones son necesarias. En efecto, si la primera no queda satisfecha, ya hemos visto antes que el cuerpo cae ó vuelve á la superficie (fig. 112, II y III). Si la segunda no quedara satisfecha, estándolo la primera, las fuerzas iguales P y P' formarían un par que haría dar vueltas al cuerpo hasta que los puntos g y c quedaran

1. Haciendo abstracción de la resistencia del líquido.

en la misma vertical, y el cuerpo no se pondría en equilibrio sino después de una serie de oscilaciones.

Demostración experimental. — Demuéstrase fácilmente la primera condición por medio del vaso de M. Boudréaux. Sumérgese un cuerpo flotante A (fig. 113), que desaloja cierto volumen de líquido, que se recoge en el vaso *v*. Obsérvase que el peso de este líquido es precisamente igual al del cuerpo flotante.

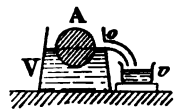


Fig. 113.

Plano de flotación. — Cuando el cuerpo flotante está en equilibrio, la superficie, libre del líquido determina en él una sección plana horizontal, llamada *plano de flotación*. Este plano queda definido por las dos condiciones de equilibrio precedentes : el peso del líquido desalojado debe ser igual al del cuerpo sólido ; el centro de gravedad del cuerpo y el de empuje deben hallarse en la misma perpendicular al plano de flotación.

Condición de estabilidad. — Por lo demás, este equilibrio puede ser estable ó inestable según que el cuerpo, separado ligeramente de su posición de equilibrio, tienda ó no á volver á ella. La estabilidad depende de la posición del centro de empuje con relación al centro de gravedad, ó más bien del lugar que ocupa, en la vertical que pasa por el centro de gravedad, y en el estado de equilibrio considerado, un punto particular llamado *metacentro*.

Posiciones del metacentro. — Sea ABC (fig. 114) la sección de un navío por un plano que pase por la vertical *xy*, donde están situados el centro de gravedad *g* del navío y el centro de empuje *c* del líquido desalojado en la posición de equilibrio normal. Cuando el navío se inclina tomando la posición A' B' C', la línea *xy* pasa á *x' y'*, y el centro de gravedad, que no cambia respecto del navío, va de *g* á *g'*, mientras que, como la forma del líquido desalojado ya no es la misma, el centro de empuje cambia respecto del navío, y toma por ejemplo la posición *c'*. Tracemos por el punto *c'* una vertical que corte á la recta *x' y'* en *m* ; puede suponerse que el empuje del líquido se aplica en el punto *m*. Si este punto se encuentra situado por encima de *g'*, es evidente que las fuerzas aplicadas en *m* y en *g'* tendrán por efecto volver el buque á su primera posición ABC y que, en consecuencia, *el equilibrio será estable*. Por el contrario, si el punto *m* está por debajo del centro de gravedad en *m'*, las dos fuerzas aplicadas en *m'* y en *g'* tendrán como consecuencia hacer dar un vuelco al navío, *y el equilibrio será inestable*. Llámase *metacentro* al punto *m* donde la vertical *c' m'* corta á la recta *x' y'*. Es, pues, posible resumir lo que precede diciendo que *los cuerpos flotantes se encuentran en equilibrio estable cuando el metacentro está por encima del centro de gravedad, y en equilibrio inestable si el metacentro está por debajo.*

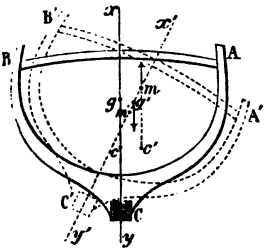


Fig. 114.

La determinación del metacentro y del centro de gravedad es de mucha importancia en la carga de los navíos, pues la estabilidad depende de su posición relativa.

119. Ludión. — Los diversos efectos de suspensión, inmersión y

flotación en un líquido se reproducen con el aparato llamado *ludión*. Compónese de una probeta de vidrio llena en parte de agua y terminada superiormente por un tubo de cobre donde se mueve un émbolo que se hace andar á mano y que lo cierre herméticamente (fig. 115). Dentro del líquido se encuentra una figurita de esmalte, sostenida por una bola de vidrio hueca *a*, que contiene aire y agua y flota en su superficie. Esta bola tiene en la parte inferior una pequeña abertura por donde puede entrar ó salir el agua, según que el aire interior de la bola está más ó menos comprimido. De modo que el agua constituye un lastre de magnitud variable, que permite modificar á voluntad el peso del cuerpo sumergido, de modo que se realicen los tres casos $P < P'$, $P = P'$ y $P > P'$.

Fig. 115.

La cantidad de agua previamente introducida en la bola es tal que el empuje P' sea ligeramente superior á P : el cuerpo empieza, pues, por flotar, saliendo un poco del agua ; pero basta dar á P un ligero aumento para que haya inmersión. Con tal fin se aprieta un poco el émbolo (fig. 115) : entonces el agua penetra en la bola, hasta que la fuerza elástica del aire que comprime, equilibre á la presión exterior que la obliga á penetrar allí : el peso del ludión aumenta y éste baja. Si entonces se deja de apretar, el aire de la bola se dilata, expulsa el exceso de agua que allí ha penetrado y el cuerpo sumergido flota de nuevo.

120. **Natación.** — El cuerpo humano es generalmente más ligero que el agua dulce, en igualdad de volumen; así es que puede flotar naturalmente en este líquido y mejor aún en el agua salada del mar, que es más densa. La dificultad de la natación consiste, pues, menos en mantenerse á flote que en poder conservar la cabeza fuera del líquido, á fin de respirar libremente. Pero como en el hombre la cabeza tiene mucho peso relativamente á los miembros inferiores, aquélla tiende á penetrar en el agua ; esto hace que la natación sea para nosotros un ejercicio que precisa aprender. Por el contrario, como los cuadrúpedos tienen una cabeza que pesa menos que la parte exterior del cuerpo, la mantienen sin dificultad fuera del agua ; así es que estos animales nadan naturalmente.

CONDICIONES DE EQUILIBRIO DE LOS LÍQUIDOS GRAVES.

121. **Equilibrio de un líquido en un solo vaso.** — Hay dos condiciones de equilibrio, que son los corolarios inmediatos del teorema fundamental :

1°. *La presión debe ser idéntica en todos los puntos de un mismo plano horizontal;*

2°. *La superficie libre del líquido debe ser plana y horizontal.*

OBSERVACIONES. — 1°. *Definición de las superficies de nivel.* — El lugar geométrico de los puntos que en un líquido en equilibrio bajo la acción de fuerzas cualesquiera soportan idéntica presión, se llama *superficie de nivel.* La superficie libre de un líquido es siempre una superficie de nivel. Compréndese además que en un líquido grave en equilibrio las superficies de nivel son planos horizontales.

2°. *Propiedad general de las superficies de nivel.* — En el caso actual, las superficies de nivel son perpendiculares á la vertical, es decir *á la dirección de la fuerza que produce el equilibrio:* esta es una propiedad general de las superficies de nivel.

3°. *Curvatura de la superficie de los mares.* — Observemos por fin que en un líquido grave en equilibrio las superficies de nivel en general y la superficie libre en particular, no pueden ser planas más que en pequeña extensión, quiere decir, en los límites dentro de que pueden considerarse paralelas las verticales. Pero esto no puede ocurrir para una superficie líquida de gran extensión como la de los mares. En efecto, puesto que la dirección de la gravedad pasa en cada lugar por el centro de la tierra, resulta de ahí que la superficie de los mares cambia también de dirección para mantenerse siempre perpendicular á la gravedad : toma pues forma sensiblemente esférica.

122. Equilibrio del mismo líquido en un sistema de vasos comunicantes. — *Enunciado de las condiciones.* — Cuando varios vasos de forma cualesquiera y que contienen el mismo líquido comunican entre sí, no hay equilibrio sino cuando :

1°. y 2°. *El líquido satisface á las dos condiciones precedentes* (121) *en cada vaso;*

3°. *Las diversas superficies libres del líquido en todos los vasos se encuentran en un mismo plano horizontal.*

Demostración de las dos primeras condiciones. — Las dos primeras condiciones son corolarios inmediatos del teorema fundamental, que es independiente de la forma del vaso que contiene el líquido.

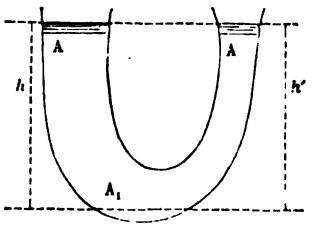


Fig. 116.

Demostración de la tercera condición. — En efecto, imaginemos el plano de nivel á que pertenece un punto A_1 (fig. 116). Sea h la distancia vertical de un punto cualquiera de una de las superficies libres por encima de este plano y h' la distancia de un punto cualquiera de la otra superficie. Puede calcularse la presión en A_1 de dos maneras y escribir

$$p = hd = h'd, \quad \text{de donde} \quad h = h'.$$

De la misma manera se demostraría que $h = h'' = h'''$, etc., sea cual fuere el número de las superficies libres y, por consiguiente, de los vasos comunicantes.

flotación en un líquido se reproducen con el aparato llamado *ludión*. Compónese de una probeta de vidrio llena en parte de agua y terminada superiormente por un tubo de cobre donde se mueve un émbolo que se hace andar á mano y que lo cierre herméticamente (fig. 115). Dentro del líquido se encuentra una figurita de esmalte, sostenida por una bola de vidrio hueca *a*, que contiene aire y agua y flota en su superficie. Esta bola tiene en la parte inferior una pequeña abertura por donde puede entrar ó salir el agua, según que el aire interior de la bola está más ó menos comprimido. De modo que el agua constituye un lastre de magnitud variable, que permite modificar á voluntad el peso del cuerpo sumergido, de modo que se realicen los tres casos $P < P'$, $P = P'$ y $P > P'$.

Fig. 115.

La cantidad de agua previamente introducida en la bola es tal que el empuje P' sea ligeramente superior á P : el cuerpo empieza, pues, por flotar, saliendo un poco del agua; pero basta dar á P un ligero aumento para que haya inmersión. Con tal fin se aprieta un poco el émbolo (fig. 115) : entonces el agua penetra en la bola, hasta que la fuerza elástica del aire que comprime, equilibre á la presión exterior que la obliga á penetrar allí : el peso del ludión aumenta y éste baja. Si entonces se deja de apretar, el aire de la bola se dilata, expulsa el exceso de agua que allí ha penetrado y el cuerpo sumergido flota de nuevo.

120. **Natación.** — El cuerpo humano es generalmente más ligero que el agua dulce, en igualdad de volumen; así es que puede flotar naturalmente en este líquido y mejor aún en el agua salada del mar, que es más densa. La dificultad de la natación consiste, pues, menos en mantenerse á flote que en poder conservar la cabeza fuera del líquido, á fin de respirar libremente. Pero como en el hombre la cabeza tiene mucho peso relativamente á los miembros inferiores, aquélla tiende á penetrar en el agua; esto hace que la natación sea para nosotros un ejercicio que precisa aprender. Por el contrario, como los cuadrúpedos tienen una cabeza que pesa menos que la parte exterior del cuerpo, la mantienen sin dificultad fuera del agua; así es que estos animales nadan naturalmente.

CONDICIONES DE EQUILIBRIO DE LOS LÍQUIDOS GRAVES.

121. **Equilibrio de un líquido en un solo vaso.** — Hay dos condiciones de equilibrio, que son los corolarios inmediatos del teorema fundamental :

1°. *La presión debe ser idéntica en todos los puntos de un mismo plano horizontal;*

2°. *La superficie libre del líquido debe ser plana y horizontal.*

OBSERVACIONES. — 1°. *Definición de las superficies de nivel.* — El lugar geométrico de los puntos que en un líquido en equilibrio bajo la acción de fuerzas cualesquiera soportan idéntica presión, se llama *superficie de nivel.* La superficie libre de un líquido es siempre una superficie de nivel. Compréndese además que en un líquido grave en equilibrio las superficies de nivel son planos horizontales.

2°. *Propiedad general de las superficies de nivel.* — En el caso actual, las superficies de nivel son perpendiculares á la vertical, es decir *á la dirección de la fuerza que produce el equilibrio:* esta es una propiedad general de las superficies de nivel.

3°. *Curvatura de la superficie de los mares.* — Observemos por fin que en un líquido grave en equilibrio las superficies de nivel en general y la superficie libre en particular, no pueden ser planas más que en pequeña extensión, quiere decir, en los límites dentro de que pueden considerarse paralelas las verticales. Pero esto no puede ocurrir para una superficie líquida de gran extensión como la de los mares. En efecto, puesto que la dirección de la gravedad pasa en cada lugar por el centro de la tierra, resulta de ahí que la superficie de los mares cambia también de dirección para mantenerse siempre perpendicular á la gravedad : toma pues forma sensiblemente esférica.

122. Equilibrio del mismo líquido en un sistema de vasos comunicantes. — *Enunciado de las condiciones.* — Cuando varios vasos de forma cualesquiera y que contienen el mismo líquido comunican entre sí, no hay equilibrio sino cuando :

1°. y 2°. *El líquido satisface á las dos condiciones precedentes* (121) *en cada vaso ;*

3°. *Las diversas superficies libres del líquido en todos los vasos se encuentran en un mismo plano horizontal.*

Demostración de las dos primeras condiciones. — Las dos primeras condiciones son corolarios inmediatos del teorema fundamental, que es independiente de la forma del vaso que contiene el líquido.

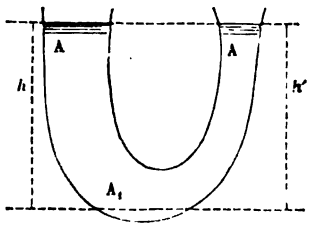


Fig. 116.

Demostración de la tercera condición. — En efecto, imaginemos el plano de nivel á que pertenece un punto A_1 (fig. 116). Sea h la distancia vertical de un punto cualquiera de una de las superficies libres por encima de este plano y h' la distancia de un punto cualquiera de la otra superficie. Puede calcularse la presión en A_1 de dos maneras y escribir

$$p = hd = h'd, \qquad \text{de donde} \qquad h = h'.$$

De la misma manera se demostraría que $h = h'' = h'''$, etc., sea cual fuere el número de las superficies libres y, por consiguiente, de los vasos comunicantes.

Comprobación. — La tercera condición puede comprobarse experimentalmente : se toma un vaso ancho (fig. 117) en cuya pared lateral se adapta con mástic un tubo de cobre horizontal, provisto de golletes metálicos verticales. En cada uno de estos golletes se pueden pegar con mástic otros tubos de vidrio de formas cualesquiera A, B, C, que forman en unión de D un sistema más ó menos complejo, de vasos comunicantes. Llenos de agua los vasos, y una vez el líquido en equilibrio, se comprueba con el catetómetro que las diversas superficies libres se encuentran en un mismo plano horizontal.

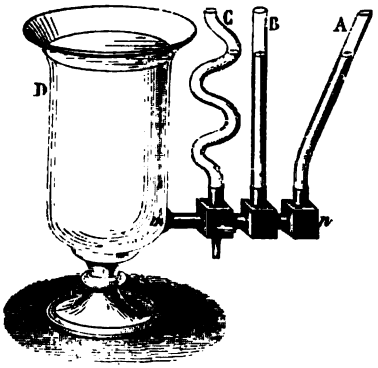


Fig. 117.

123. Equilibrio de los líquidos superpuestos. — *Enunciado de las condiciones.* — Cuando se vierten en un mismo vaso varios líquidos, que no pueden mezclarse sin ejercer acciones químicas unos sobre otros, precisa para que haya equilibrio :

1°. y 2°. *Que cada uno de ellos satisfaga á las condiciones necesarias en el caso de un solo líquido* (121) ;

3°. *Que los líquidos estén superpuestos por orden de densidades crecientes de arriba abajo;*

4°. *Que las superficies de separación de los líquidos (dos á dos) sean horizontales.*

Las condiciones de equilibrio relativas á cada uno de los líquidos superpuestos no necesitan ser demostradas. Son evidentemente necesarias en todos los casos.

Demostración de la tercera condición. — Se la deduce del principio de Arquímedes y del equilibrio de los cuerpos sumergidos. Es evidente que una gota de un líquido pesado como el mercurio, colocada en otro menos denso como el agua, caerá necesariamente al fondo. Por el contrario, una gota de un líquido ligero como el aceite, flotará en la superficie de un líquido más denso como el agua.

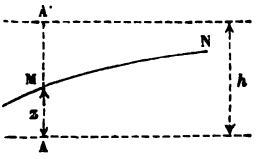


Fig. 118.

Demostración de la cuarta condición. — La cuarta condición es una consecuencia del teorema fundamental.

Sea MN el corte ó sección de una superficie de separación de forma cualquiera por un plano vertical. Sean dos planos horizontales A y A', distantes de h, uno en el líquido inferior y otro en el superior. Marquemos tres puntos A, M, A', tomados en la misma vertical (fig. 118), que

se encuentren en el líquido inferior en la superficie de separación y en el líquido superior. Llamemos p, ω y p' las presiones en estos tres puntos; d y d' los pesos de ambos líquidos, en la unidad de volumen. Primeramente se tiene

[1] $$p = \omega + zd,$$

(z, distancia del punto M al plano inferior).
Se tiene análogamente

[2] $$\omega = p' + (h - z)\,d'.$$

Eliminando ω entre estas dos ecuaciones, resulta

$$d = p' + zd + (h - z)\,d' = p' + hd' + z\,(d - d').$$

De aquí se deduce

$$z = \frac{p - p' - hd'}{d - d'}.$$

Los términos del segundo miembro son constantes : luego z es constante. Todos los puntos de la superficie de separación están pues á la misma distancia del plano A : en consecuencia esta superficie es un plano horizontal.

Comprobación de la tercera condición. — Se la demuestra por medio del *vaso de los cuatro elementos* (fig. 119). Llámase así á un frasco largo y estrecho, que contiene mercurio, agua saturada de carbonato de potasa, alcohol teñido de rojo y aceite de nafta. Cuando se agita el frasco, los cuatro líquidos parecen mezclarse; pero así que se les deja en reposo, el mercurio, que

Fig. 119.

Fig. 120.

es el más denso, se precipita al fondo, colocándose después encima y sucesivamente el agua, el alcohol y el aceite de nafta. Tal es en efecto el orden de las densidades decrecientes de estos cuerpos. El agua se satura de carbonato de potasa para que no se mezcle con el alcohol, pues la mencionada sal no es soluble en este cuerpo.

Observaciones. — 1°. *Caso de los líquidos miscibles entre sí. — Difusión de los líquidos.* — Importa hacer notar que el estado de equilibrio

de los líquidos superpuestos no es rigurosamente estable sino en tanto que no pueden mezclarse unos con otros. En el caso contrario, si son miscibles ó, según la expresion técnica, *difusibles*, acaban por mezclarse espontánea é íntimamente. He ahí en qué consiste el fenómeno de la *difusión de los líquidos*, estudiado por Graham.

Por ejemplo, si llenamos en sus tres cuartas partes una alta probeta de vidrio (fig. 120) con tintura de tornasol dilatada, y se hace llegar lentamente ácido sulfúrico á la parte inferior con ayuda de un embudo de cuello largo, la superficie de separación entre el líquido incoloro y el azul empieza por ser muy precisa; mas pronto se ve que el tornasol va poniéndose encarnado de abajo arriba. Al cabo de cuarenta y ocho horas, el licor se ha enrojecido en toda su altura, lo que prueba la difusión recíproca de los dos líquidos.

2°. *Varias consecuencias.* — Á la tercera condición se debe que el agua dulce sobrenade bastante tiempo sobre la salada del mar en la desembocadura de los ríos, y que la nata, inferior en densidad á la leche, se separe poco á poco de ésta, subiendo á la superficie.

124. — **Equilibrio de dos líquidos heterogéneos en dos vasos comunicantes.** — *Enunciado de las condiciones.* — Cuando dos líquidos, desigualmente densos, y sin acción química uno sobre otro, están contenidos en dos vasos comunicantes, precisa, para que estén en equilibrio :

1°, 2°, 3° y 4°. *Que satisfagan á las tres condiciones de equilibrio de un solo líquido en vasos comunicantes* (122), *y además á las de dos líquidos superpuestos en un solo vaso* (123);

5°. *Que las alturas de las dos superficies libres sobre la superficie común de separación, estén en razón inversa de los pesos específicos*[1] *de ambos líquidos.*

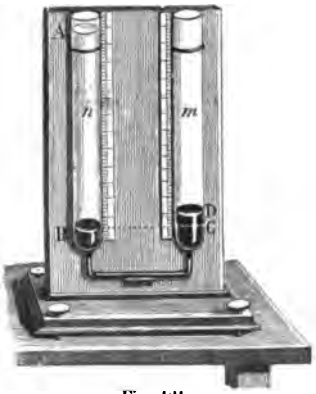


Fig. 121.

Demostración experimental. — Tómense dos tubos de vidrio, *m*, *n*, unidos por medio de otro de pequeño diámetro, y fijos en una tabla vertical (fig. 121); viértese en ellos cierta cantidad de mercurio, y luego en una de las ramas AB se echa agua. Como la columna AB ejerce una presión sobre el mercurio en C, el nivel de éste baja en la rama AB y sube en la otra cierta cantidad CD; de manera que, obtenido el equilibrio, si se concibe en B un plano horizontal BC, la columna de agua AB equilibra á la de mercu-

1. Pronto veremos que se llama *peso específico* de un cuerpo al peso de su unidad de volumen.

rio DC. Midiendo entonces las alturas DC y AB por medio de dos escalas, colocadas paralelamente á los dos tubos, ó mejor aún, por medio de un catetómetro, se observa que la primera es 13 veces y media más pequeña que AB. Ahora bien, el mercurio pesa 13 veces y media más que el agua, dada igualdad de volumen : luego las alturas están en razón inversa de los pesos específicos.

Demostración teórica. — Esta condición de equilibrio es fácil de demostrar *a priori*. Basta con aplicar dos veces el teorema fundamental á la superficie de separación B de los dos líquidos (fig. 122). Sean d y d' los pesos específicos de los líquidos, h y h' las distancias verticales de las dos superficies libres al plano BB' de separación. La presión es la misma en todos los puntos de este plano. En la rama B tiene por expresión, hd, prescindiendo de la presión atmosférica; análogamente, en la rama B' la presión en un punto es $h'd'$.

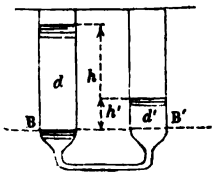


Fig. 122.

Tiénese, pues

$$p = hd = h'd', \quad \text{de donde} \quad \frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}.$$

que era lo que se trataba de demostrar.

CAPÍTULO III

APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS DE HIDROSTÁTICA.

DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES Y PESOS ESPECÍFICOS. AREÓMETROS. — APLICACIONES DIVERSAS.

DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES.

125. **Definiciones generales.** — *Densidad absoluta.* — Llámase *densidad absoluta* de una sustancia á la masa de ella contenida en la unidad de volumen. En el sistema métrico sería la masa del decímetro cúbico. (En el sistema de unidades C. G. S., es la masa del centímetro cúbico.)

Peso específico absoluto. — Denomínase *peso específico absoluto* de una sustancia al peso de 1 *centímetro cúbico* (sistema C. G. S.) de esta sustancia.

Relación entre la densidad absoluta y el peso específico absoluto de una misma sustancia. — La ecuación general $P = Mg$, que enlaza la masa y el peso de un volumen cualquiera de una sustancia, se aplica evidentemente á la masa y al peso de la unidad de volumen. Llamando d á la primera y p al segundo, se tiene

$$p = dg.$$

De esta relación resulta :

1°. Que el peso específico absoluto y la densidad absoluta de una sustancia son dos coeficientes claramente distintos uno de otro.

2°. Que el peso específico de una sustancia varía proporcionalmente á g.

3°. Que los pesos específicos de los diferentes cuerpos son proporcionales á sus densidades *en un mismo lugar del globo.*

Ejemplos. — La densidad absoluta del agua pura (á 4°) no es igual á la unidad C. G. S., porque el kilogramo-tipo, depositado en los Archivos franceses, no pesa exactamente 1000 gramos métricos. De esto resulta que la milésima parte de la masa del kilogramo-tipo, es decir, la unidad de masa C. G. S. no es idéntica á la masa de 1 centímetro cúbico de agua pura (á 4°), esto es, á la *densidad absoluta* del agua pura (á 4°). Esta densidad absoluta se encuentra representada, según los trabajos más recientes, por el número 1,000013. Tiénese

$$d = 1{,}000013 \text{ (en gramos-masa).}$$

Por consecuencia, el *peso específico absoluto* del agua pura (á 4°) está dado en París por el número dg, ó $1{,}000013 \times 960{,}93$ ($= 980.97$). Resulta, pues

$$p = 980{,}97 \text{ (en dinas).}$$

Mientras que la densidad absoluta del agua es en todas partes igual á 1,000013, su peso específico absoluto sólo es de 980,97 en la latitud y á la altura de París; en todos los demás lugares es diferente.

Peso específico relativo y densidad relativa. — Supongamos que se busque la relación del peso específico absoluto p de una sustancia con el peso específico absoluto p' de otra sustancia, designada como término de comparación. Entre el peso p y la densidad absoluta d de la primera sustancia teníamos la relación

$$[1] \qquad p = dg;$$

análogamente, entre el peso p_0 y la densidad absoluta d_0 de la sustancia tipo existe la relación

$$[2] \qquad p_0 = d_0 g.$$

Dividiendo, resulta.

$$[3] \qquad \frac{p}{p_0} = \frac{d}{d_0}.$$

El cociente $\frac{p}{p_0}$ de los pesos específicos absolutos es, pues, un número constante, independiente de g, é igual al cociente $\frac{d}{d_0}$ de las

densidades absolutas. El cociente $\frac{p}{p_0}$ se llama *peso específico relativo* de la primera sustancia (con relación á la segunda) y el cociente $\frac{d}{d_0}$ se denomina la *densidad relativa* de la primera sustancia (respecto de la sustancia-tipo).

Vese que el *peso específico relativo* es igual á la *densidad relativa;* he ahí porque se usan en la práctica estas expresiones como equivalentes entre sí; no hay inconveniente en ello, toda vez que designan el mismo coeficiente.

La sustancia-tipo universalmente adoptada para los cuerpos sólidos y líquidos es el agua pura (á la temperatura de 4°) ; y el aire (á la temperatura 0° y bajo la presión 760^{mm}) para todos los gases.

Expresión del peso específico absoluto en función del peso específico relativo. — Sea δ el valor común de los dos cocientes $\frac{p}{p_0}$ y $\frac{d}{d_0}$. El cociente δ es lo que ordinariamente se llama *densidad* del cuerpo : es el número consignado en las *tablas de densidad*[1].

Tiénese pues

$$\frac{p}{p_0} = \delta, \quad \text{de donde se deduce} \quad p = p_0\delta. \qquad [4]$$

La ecuación [4] es una fórmula general que se aplica á todos los cuerpos, sólidos, líquidos y gaseosos. Significa que el *peso específico absoluto* de un cuerpo cualquiera es igual al producto de su densidad (tabular) por el peso específico absoluto de la sustancia-tipo. Para los gases, el coeficiente p_0 es igual al peso del litro de aire normal ($1^g,293$ en París). Para los cuerpos sólidos y líquidos, p_0 es igual al peso específico absoluto del agua pura (á 4°) ; *en la práctica* se considera igual á la unidad. Por consiguiente, la fórmula general [4] pasa á ser en el caso de los gases

$$[4\ bis] \qquad p = 1^g,293 \times \delta$$

y en el de los líquidos y de los sólidos

$$[4\ ter] \qquad p = \delta.$$

En la fórmula [4 *bis*], p está expresado en gramos y representa el peso de un litro de gas, siendo δ la densidad del gas con relación al aire. En la fórmula [4 *ter*], p está también expresado en gramos, pero representa el peso de un centímetro cúbico del cuerpo, siendo δ la densidad relativamente al agua pura (á 4°).

Observaciones. — 1°. En realidad el peso p_0 de un centímetro cúbico de agua pura (á 4°) no es igual á 1 : se ha visto en efecto, que el kilogramo de los Archi-

1. Por lo cual se dice también *densidad tabular*.

vos no está rigurosamente acorde con su definición teórica, y que es inferio en 0,000013 próximamente, al peso de 1 decimetro cúbico de agua pura (á 4°). De ahí resulta que la fórmula [4 *ter*] no es completamente exacta. Deberíamos escribirla

$$p = 1{,}000013 \times \delta.$$

Pero como la diferencia entre p_0 y la unidad se refiere únicamente á la quinta decimal — número que rara vez se alcanza en las medidas de densidad, — podemos despreciarla, y considerar verdadera en la práctica la fórmula $p = \delta$.

2°. Hemos visto en el sistema C. G. S. que p es el peso de un centímetro cúbico de la sustancia, y p_0 el de un centímetro cúbico de agua pura (á 4°). Antes hemos dicho que p_0, expresado en dinas, es igual á $980{,}96 \times 1{,}000013 = 980{,}97$ dinas, ó bien á 980,96 dinas si se desprecian los 13 millonésimos de la densidad del agua. Será, pues, posible expresar en dinas el peso específico de una sustancia sólida ó líquida cualquiera mediante la fórmula

$$[5] \qquad p = 980{,}95 \times \delta.$$

Peso de un volumen cualquiera de un cuerpo sólido ó líquido. — Sea P el peso desconocido de un volumen V de una sustancia cualquiera, sólida ó líquida. Suponemos conocida la densidad (tabular) de la sustancia.

Si p es el peso específico absoluto, quiere decir el peso de la unidad de volumen, V unidades de volumen pesarán evidentemente V veces más : se tendrá pues :

$$[6] \qquad P = Vp.$$

En el sistema métrico, V se calculará en decímetros cúbicos, p estará dada por la fórmula [4 *ter*] y P se expresará en kilogramos.

En el sistema C. G. S., se calculará V en centímetros cúbicos, p estará dado por la fórmula [5] y P se expresará en dinas.

Nueva definición de la densidad relativa. — La fórmula [6] da el peso de un volumen V de una sustancia cualquiera. Apliquémosla al caso del agua pura (á 4°) : busquemos el peso P_0 de un volumen V, se tendrá evidentemente.

$$[6\ bis] \qquad P_0 = Vp_0.$$

Dividiendo miembro á miembro las ecuaciones [6] y [6 *bis*], resulta

$$\frac{P}{P_0} = \frac{p}{p_0}.$$

Pero hemos visto que el cociente $\frac{p}{p_0}$ es precisamente igual á δ. Puede decirse en consecuencia también que el *peso específico relativo* ó *densidad relativa* (ó *densidad tabular*) de una sustancia cualquiera es igual al *cociente de los pesos de volúmenes iguales* de sustancia y de agua pura (á 4°).

126. **Determinación de las densidades ó pesos específicos.** — *Método.* — Para determinar los pesos específicos de los sólidos y de los

líquidos no se emplea sino un método que consiste en averiguar : 1°. el peso de cierto volumen del cuerpo; 2°. el peso de un volumen igual de agua; y en dividir después el primer resultado por el segundo. Este método se aplica de tres maneras diferentes, que constituyen otros tantos procedimientos experimentales : el *de la balanza hidrostática*, el *de los areómetros* y el *del frasco*.

Condiciones experimentales. — Es necesario adoptar temperaturas fijas para los cuerpos cuyo peso específico se trata de averiguar y para el agua con que se les compara. Así es que se ha convenido en tomar á los primeros á la temperatura de cero y al agua á la de 4°, que es el momento en que alcanza su máximum de densidad. La condición de pureza es igualmente indispensable para el agua, pues el peso específico de este líquido varía con las sustancias que mantiene en disolución.

Correcciones usuales. — Como estas diferentes condiciones no se obtienen generalmente en las circunstancias en que precisa operar, hay que efectuar algunas correcciones sobre los resultados inmediatos de la experiencia. Refiérense á la temperatura de los cuerpos, á la del agua, y por fin á la pérdida de peso que sufren los cuerpos pesados en el aire.

Principalmente en lo que se refiere al agua es muy difícil obtenerla y conservarla, aunque sea escasa cantidad, á la temperatura de 4°. Hay que contentarse con tomarla á una temperatura fija cualquiera, sea la del laboratorio, sea el grado cero, lo cual es preferible. El resultado será objeto de una corrección, para reducirlo á lo que hubiera sido con el agua á 4°. Esta corrección es muy sencilla : resulta de la definición misma del peso específico relativo y es independiente de la noción del coeficiente de dilatación.

Sea P el peso de un volumen V del cuerpo á cero, sea P'_0 él peso de un volumen igual de agua á cero y sea P'_4 el peso de este mismo volumen de agua á 4°. Tiénese la identidad siguiente

$$\frac{P}{P'_4} = \frac{P}{P'_0} \times \frac{P'_0}{P'_4}.$$

Ahora bien, $\frac{P}{P'_4}$ es, por definición, el peso específico relativo del cuerpo; $\frac{P}{P'_0}$ es el peso específico aproximado, que la experiencia suministra directamente; en fin $\frac{P'_0}{P'_4}$ es, por definición, el peso específico del agua á cero respecto del agua á 4°. La corrección consistirá pues en multiplicar el número obtenido directamente por la densidad del agua á la temperatura de la experiencia. Ahora bien, el estudio de la dilatación del agua ha permitido construir una tabla de las densidades del agua á todas las temperaturas usuales.

127. **Densidad de los sólidos.** — 1°. *Procedimiento de la balanza hidrostática.* — Este procedimiento es una aplicación inmediata del principio de Arquímedes. La balanza hidrostática, ó el montante de cremallera, sirve para aplicarlo.

Operación. — 1°. Se ata el cuerpo por medio de un hilo fino del

garfio de uno de los platillos (fig. 123) y se equilibra en el otro con perdigones. Después se retira el cuerpo y se le reemplaza por pesos conocidos hasta que se restablezca el equilibrio. Sea P la suma de los pesos conocidos que ha sido preciso emplear : este es evidentemente el peso del cuerpo (doble pesada).

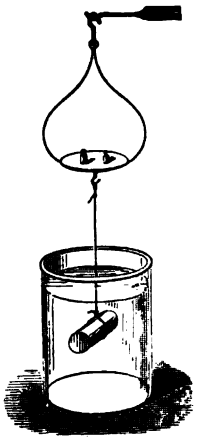


Fig. 123.

2°. Retíranse del platillo los pesos conocidos y se vuelve á colgar el cuerpo del platillo, dejando en el otro los mismos perdigones que antes. Entonces se sumerge el cuerpo completamente en el agua de un vaso colocado debajo.

Como el cuerpo sumergido pierde una parte de su peso igual al del agua desalojada (113), se añade en el platillo correspondiente un peso P', que vuelve el fiel á su primera posición : P' representa evidentemente el peso del agua desalojada en volumen igual al del cuerpo.

Por definición se tiene $D = \frac{P}{P'}$.

Observaciones. — 1°. Este procedimiento es muy rápido, toda vez que permite efectuar dos dobles pesadas con tres pesadas simples solamente ; pero tiene el inconveniente de no ser muy preciso. Su defecto principal consiste en la pesada hidrostática y en la atracción capilar[1] que experimenta el hilo de suspensión ; no es posible valorar estos dos efectos y por otra parte es difícil mantenerlos constantes. Estas causas de error se atenúan mucho empleando un alambre de platino muy delgado, que se cubre con una ligera capa de negro de humo, para impedir que lo moje el agua, se le sumerge siempre la misma cantidad.

2°. Más vale servirse de una balanza ordinaria que de la hidrostática, pues si se mueve el fiel con ayuda de la cremallera para producir la inmersión del cuerpo sólido, ya no es posible tener por exacta la doble pesada.

2°. *Procedimiento de los areómetros.* — Este procedimiento tiene como carácter el uso de aparatos flotadores llamados *areómetros*[2], cuya construcción se funda en el equilibrio de los cuerpos flotantes.

Aparato. — El areómetro llamado de *Nicholson*[3] (fig. 124) es el que sirve en este caso particular. Compónese de un cilindro hueco de latón B, lastrado por medio de un cono C lleno de plomo y que lleva en la parte superior un platillo A para poner los pesos y el cuerpo.

Operación. — 1°. Colócase primero el cuerpo sólido en el platillo A y se añade una tara, de modo que se obtenga la coincidencia de la

1. Véase la definición y explicación de este fenómeno en el capítulo consagrado á la capilaridad.

2. De ἀραιός, tenue, ligero, y μέτρον, medida.

3. Este aparato, que se atribuye equivocadamente á Nicholson, fué imaginado en realidad por el físico francés Charles, quien lo aplicó á la determinación de la densidad de los sólidos con el nombre de *areómetro-balanza*.

superficie líquida con el punto *o* marcado en el vástago. Después se retira el cuerpo reemplazándolo por pesos conocidos P hasta obtener la misma coincidencia : P representa entonces el peso del cuerpo, obtenido por doble pesada.

2°. Se retira el areómetro y se transporta el cuerpo al platillo inferior C, poniéndolo en *m*. El peso total del instrumento no ha variado, y sin embargo, al introducirlo de nuevo en el líquido, se observa que no llega ya al mismo punto: esto se debe á la pérdida de peso que ha sufrido el líquido sumergido. Si entonces se añaden pesos conocidos P' en el platillo superior hasta restablecer la coincidencia, se tiene el peso del volumen de agua desalojado.

El cociente de estos pesos da la densidad buscada $D = \frac{P}{P'}$ (en las condiciones de temperatura en que se ha operado).

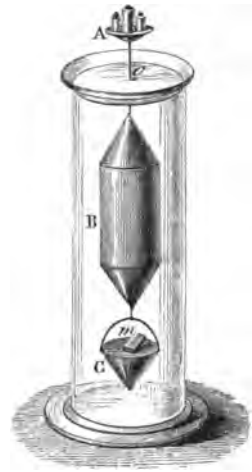


Fig. 124.

Observaciones. — 1°. Si la sustancia fuese más ligera que el agua, tendería á sobrenadar y no podría permanecer en el platillo inferior. En este caso se adapta al mismo un pequeño enrejado movible, que se opone á la ascensión del cuerpo, y el resto del experimento se efectúa como queda dicho.

2°. Este procedimiento es poco preciso porque el areómetro constituye una balanza muy imperfecta; pero así se obtienen sencillamente y con rapidez los resultados apetecidos. Así es que los mineralogistas lo usan mucho, sobre todo cuando van de viaje, caso en que no puede recurrirse á ningún otro sistema.

3°. *Procedimiento del frasco.* — Este procedimiento, imaginado por Klaproth y perfeccionado por Regnault, es el único realmente exacto : así es que conviene efectuar las operaciones que exige con agua destilada y á la temperatura del hielo fundente. Entonces hay medio de someter el resultado á correcciones rigurosas.

Aparato. — Úsase un pequeño frasco de ancho gollete, cerrado con un tapón de vidrio esmerilado. Este tapón está taladrado por un agujero, que se prolonga en un tubito capilar, terminado en otro pequeño y de diámetro grande (fig. 125). En el tubito se marca un punto de referencia *a*, hasta donde se llena el frasco en cada operación : esto se obtiene sumergiendo enteramente el frasco en el agua y tapándolo mientras se encuentra en esa situación.

Operación. — 1°. Una vez llenos el frasco y el tubito, se retira el agua que exceda del punto *a* empapando un pedazo de papel secante. Después se coloca en uno de los platillos de una balanza el frasco bien cerrado y cuidadosamente limpio, y á su lado el cuerpo

cuyo peso específico se busca, ya en fragmentos, ya en polvo. Se equilibra con perdigones y después se quita el cuerpo, sustituyéndolo por un número de gramos P : este es su peso en el aire.

Fig. 125.

2°. Retírase el frasco, destápasele é introdúcese el cuerpo en él; después se pone de nuevo el tapón y se coloca el frasco otra vez en el mismo platillo. El equilibrio se rompe, pues ha salido al exterior cierta cantidad de agua; entonces se añaden pesos en el lado del frasco hasta que el fiel vuelva á indicar equilibrio: este es el peso de un volumen de agua igual al del cuerpo.

El cociente $\frac{P}{P'} = D$ representa la densidad buscada.

Observaciones. — 1°. En este experimento importa evitar la presencia de burbujas de aire, sea en el agua del frasco, sea en la superficie del cuerpo sólido : esto haría inexactas las pesadas. Empiézase por purgar de aire, mediante prolongada ebullición, el agua que debe servir para las operaciones; después, así que se introduce el cuerpo, sea en polvo, sea en fragmentos, en el agua del frasco, colócase éste debajo de la campana de la máquina neumática y se hace el vacío; entonces se desprende en virtud de su fuerza elástica el aire adherente al cuerpo ó á las paredes del frasco.

2°. La principal ventaja de este procedimiento es que se puede operar con fragmentos de la sustancia, bastante pequeños para evitar las cavidades interiores. La precisión del procedimiento no está limitada más que por la dificultad de colocar el tapón exactamente de la misma manera en las operaciones sucesivas.

128. **Casos particulares de la densidad de los sólidos.** — 1°. *Cuerpos solubles en el agua.* — Si el cuerpo cuyo peso específico se trata de averiguar fuere soluble en el agua, se averiguará dicho peso relativamente á un líquido en que no sea soluble. Buscando después, por uno de los precedimientos que vamos á describir, el peso específico del líquido auxiliar, se obtendría el de la sustancia dada, multiplicando estos dos resultados uno por otro.

Por ejemplo, si se trata de determinar la densidad del azúcar, se operará con el frasco, ya valiéndonos de aceite de olivo, ya de esencia de trementina, pues el azúcar es completamente insoluble en estos líquidos.

2°. *Cuerpos sólidos alterables por los líquidos.* — Finalmente, hay sustancias que no es posible poner en contacto con ningún líquido sin alterarlas : tal es la pólvora. En este caso se determina primeramente el peso P del cuerpo, después su volumen V sin ponerlo en contacto con ninguno de los líquidos usuales. La densidad está dada por la fórmula $d = \frac{V}{P}$.

Para determinar V se ha usado durante mucho tiempo un aparato llamado *volumenómetro*, donde la pólvora se pone en contacto de una atmósfera gaseosa. El principio del método es una aplicación de la ley de Mariotte, que más adelante explicaremos. Pero desde ahora debemos decir que este método ha tenido que ser abandonado, por motivo de una causa de error inherente á la composición de las pólvoras. El carbón que éstas contienen participa de la propiedad de condensar los gases en proporción variable, según la presión de la atmósfera ambiente; este fenómeno hace inaplicable la ley de Mariotte y, en consecuencia el aparato no sirve. Así es que los operadores se contentan con calcular el volumen de un peso P de pólvora por el del mercurio que ésta desaloja, después que se la ha privado en el vacío de las burbujas gaseosas que mantiene condensadas.

129. **Densidades de los líquidos.** — Para los líquidos se emplea el mismo método de determinación que para los sólidos, y se le aplica mediante tres procedimientos análogos.

I. *Procedimiento de la balanza hidrostática.* — Se cuelga del garfio de

uno de los platillos de la balanza una bola de vidrio hueco, convenientemente lastrada con plomo ó mercurio (fig. 126). El equilibrio se establece en el otro platillo con perdigones. Después se sumerge el cuerpo sucesivamente en agua destilada y luego en el líquido cuyo peso específico se busca: cada vez se rompe el equilibrio; los pesos P y P', que hay que añadir para restablecerlo, representan el peso del agua desalojada, y luego el del líquido en igualdad de volumen: tiénese $D = \frac{P'}{P}$.

Fig. 126.

II. *Procedimiento del areómetro.* — El areómetro que se usa para los líquidos fué imaginado por Fahrenheit (fig. 127).

Aparato. — Este flotador no tiene platillo en la parte inferior, y es todo de vidrio, para que se le pueda introducir en toda clase de líquidos. También su vástago tiene un punto de coincidencia, destinado á obtener un volumen sumergido constante; se le lastra en la parte inferior con una pequeña bola llena de mercurio.

Operación. — 1°. Antes de experimentar con este areómetro, se determina con precisión su peso; sea Q este peso.

2°. Se pone á flotar el areómetro en una probeta llena de agua destilada y se añaden pesos en la cápsula superior hasta que el punto de coincidencia llegue al nivel del agua. En este estado (118), el peso del areómetro, agregado al de la cápsula, representa el de un volumen de agua igual al de la parte sumergida del instrumento. Sean p la suma de los pesos conocidos puestos en el platillo superior y P el peso total del volumen de agua desalojado; tiénese $P = Q + p$.

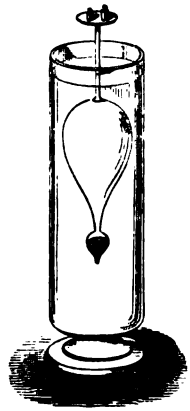


Fig. 127.

Fig. 128.

3°. Se determina del mismo modo el peso de un volumen igual del líquido y se tiene $P' = Q + p'$.

Entonces resulta, por definición,

$$D = \frac{P'}{p} = \frac{Q + p'}{Q + p}.$$

III. *Procedimiento del frasco.* — Tratándose de líquidos, el frasco tiene forma especial (fig. 128).

Aparato. — Compónese de un depósito cilíndrico *b* al cual se encuentra unido un vástago capilar y á éste un tubo más grueso *a*, que puede cerrarse con un tapón de vidrio (en el caso de experimentar con líquidos volátiles). En el vástago capilar se marca un punto de coincidencia *c*, á fin de marcar volumen constante de líquido.

Operación. — 1°. Empiézase por llenar el frasco. Se introduce al efecto en el depósito un tubo muy delgado, sea uno filiforme de vidrio estirado, sea uno capilar de plata : tal fué el usado por Regnault con el nombre de *hilo capilar de plata*. Viértese el líquido en el embudo superior y se aspira el aire interior : la presión atmosférica hace penetrar entonces el líquido en el depósito inferior. El tubo capilar sirve también para expulsar las burbujas de aire adherentes al vidrio y retirar el exceso del líquido. Como este procedimiento es susceptible de gran precisión, conviene operar á cero. Para ello se llena primero el frasco á la temperatura ambiente y después se le lleva al hielo fundente; cuando ha tomado esta última temperatura, se extrae el exceso de líquido por encima de la marca. Déjasele recobrar la temperatura exterior antes de pesarlo, á fin de evitar el depósito de rocío sobre el frasco durante la operación.

2°. Se coloca primero el frasco lleno de aire en uno de los platillos de la balanza, y en el otro se ponen pesos conocidos cuya suma sea superior al peso probable del líquido más pesado que deba llenar el frasco; después se hace la tara.

3° Después se llena el frasco con el líquido menos pesado, según acabamos de decir; enjúgasele, se le deja volver á la temperatura ambiente y se le coloca otra vez en el platillo. El equilibrio desaparece, y para restablecerlo basta retirar parte de los pesos conocidos. Sea P la suma de estos pesos retirados : ese es el peso, obtenido por doble pesada, de un volumen del líquido igual al del frasco á cero.

4°. Llénase luego el mismo frasco con el segundo líquido, y se vuelve á colocarlo en el platillo. Quedará roto evidentemente el equilibrio anterior, pero bastará retirar también algunos pesos conocidos para restablecerlo : sea P′ la suma de los pesos retirados en las dos operaciones sucesivas, P′ es el peso de un volumen del líquido igual al volumen del frasco á 0°.

5° Obteniendo el cociente de estos dos pesos (supongamos que P′ corresponde al agua), se tiene la densidad buscada $D = \frac{P}{P'}$.

Esta es la densidad á 0° del líquido relativamente al agua á 0°; $\frac{P}{P'}e_0$ representaría su densidad á 0° respecto del agua á 4°.

Método de las columnas líquidas equivalentes. — Se puede emplear otro método, que es una aplicación de las condiciones de equilibrio de dos líquidos superpuestos en dos vasos comunicantes.

Supongamos en efecto que una de las ramas del tubo (fig. 122) contiene agua y la otra aceite, y que las alturas respectivas de las columnas líquidas que se equilibran sean 38 centímetros para el aceite y 35 para el agua. Tomando como unidad la densidad del agua, si representamos por x la del aceite, tenemos la ecuación de equilibrio

$$\frac{38}{35} = \frac{1}{x}; \qquad \text{de donde} \qquad x = \frac{35}{38} = 0{,}921.$$

Observación. — Más adelante veremos que este método fué utilizado por Dulong y Petit, y luego por Regnault, para comparar las densidades del mercurio á diferentes temperaturas y deducir de ahí la ley de dilatación de este líquido.

AREÓMETROS.

130. **Diferentes tipos de areómetros.** — Constrúyense dos clases de areómetros : los llamados *de volumen constante y de peso variable* y los de *peso constante y volumen variable.*

Los areómetros de Nicholson y de Fahrenheit, que anteriormente hemos descrito, pertenecen á la primera categoría. Son *de volumen constante*, porque se les hace penetrar siempre en el líquido hasta la misma marca de coincidencia, y *de peso variable*, porque esta inmersión se obtiene cargándolos de pesos que *varían* con los sólidos ó los líquidos objeto de la experimentación. Su único objeto es la determinación rápida, aunque sólo aproximada, de las densidades.

Los areómetros de la segunda especie se llaman *de volumen variable y de peso constante*, porque no tienen punto fijo de coincidencia y conservan siempre el mismo peso. Estos aparatitos sirven en la práctica (con los diversos nombres de *pesa-sales*, *pesa-ácidos*, *pesa-licores*), para determinar rápidamente, no la densidad, sino el grado de concentración de las disoluciones salinas de los ácidos y de los licores alcohólicos.

131. **Areómetros de Baumé.** — *Descripción.* — Baumé, farmacéutico de París, construyó á principios del siglo dos tipos de areómetros de pesos constantes, cuyo uso es todavía muy general. Son unos flotadores de vidrio, formados por un vástago graduado al cual va unida una cavidad esférica (fig. 129 y 130) ó cilíndrica (fig. 131) llena de aire, seguida á su vez de una bola más pequeña, llena de mercurio, que sirve de lastre.

Graduación. — Uno de estos instrumentos debe servir para líquidos más densos que el agua, como los ácidos, los jarabes ó las disoluciones salinas : llámasele *pesa-ácidos* ó *pesa-sales*; el otro se destina á líquidos menos densos que el agua, como los éteres, las soluciones amoniacales, los licores alcohólicos ó *espíritus* : recibe el nombre de *pesa-espíritus* ó *pesa-licores*. Teniendo en cuenta estos distintos usos, Baumé adoptó un modo particular de graduación arbitraria.

1°. *Pesa-ácidos, pesa-sales, pesa-jarabes.* — Se arregla el peso del instrumento (*lastrándolo*) de manera que á la temperatura de 12°,5

centígrados (ó 10° Réaumur), penetre en el agua pura hasta la extremidad de su vástago próximamente: en este punto A se marca 0° (fig. 129). Después se introduce el aparato en una disolución de 85 partes de agua en peso y de 15 de sal marina. Como este líquido, que tiene 1,116 de peso específico, es más denso que el agua pura, el areómetro sólo se unde en él hasta el punto B, donde se marca 15. Por fin, el espacio comprendido entre A y B se divide en 15 partes iguales, continuando las divisiones hasta el punto inferior del vástago, que debe ser bastante largo para contener 70 grados próximamente en los pesa-ácidos. Casi siempre se marcan estas divisiones en una tira de papel que se introduce en la parte hueca del vástago.

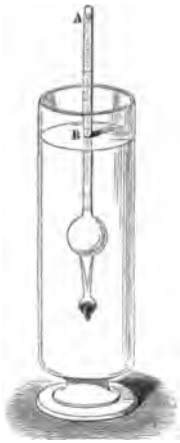


Fig. 129.

El areómetro construído de esta manera no puede evidentemente servir sino para líquidos donde penetre *menos* que en el agua, es decir más densos que ésta.

2°. *Pesa-espíritus, pesa-licores.* — En los instrumentos destinados á líquidos menos densos que el agua, el cero deberá estar necesariamente en la parte inferior del vástago (fig. 130). Introdúcese el aparato en una disolución de 90 partes en peso de agua destilada y de 10 de sal marina (densidad = 1,0847) y se marca cero en el punto que toca á la superficie, y 10 en el mismo punto dentro del agua destilada (á la temperatura de 12°,5 C). Este último punto se encuentra necesariamente por encima del anterior en el vástago del areómetro, toda vez que el agua pura es menos densa que la disolución salina. Después se divide el intervalo en 10 partes iguales y se prolonga esta graduación hasta lo alto del vástago, que debe poder contener de 50 á 60 grados.

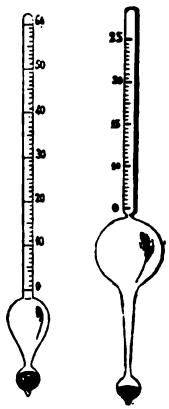


Fig. 130.

Usos. — Estos dos areómetros, que se gradúan de manera completamente arbitraria, no pueden indicar ni las densidades de los líquidos ni las cantidades de sal disueltas. Sin embargo, se les usa con ventaja para reconocer si una disolución salina ó ácida ha alcanzado el punto de concentración apetecido. Sábese, por ejemplo, que el pesa-ácidos debe marcar:

66 en el ácido sulfúrico concentrado,
26 en el ácido nítrico del comercio,
22 en el ácido clorhídrico ordinario,
2 en el agua de mar (á la temperatura de 22 C.)

También se sabe que el mismo aparato debe marcar en frío:

35 en un jarabe bien hecho

Esto permite vigilar metódicamente en la fabricación de los jarabes la marcha de su concentración.

Análogamente, el pesa-espíritus debe marcar en casos normales:

36 en el éter ordinario del comercio,
65 en el éter ordinario rectificado,
De 22 á 25 en el amoniaco del comercio, más ó menos concentrado.

Observación. — *Otra manera de graduar el pesa-ácidos.* — La disolución salina de Baumé puede ser reemplazada por uno cualquiera de los líquidos precedentes, cuyo grado sea bien conocido. Así, pueden tomarse como puntos fijos: 1°. el punto de flote en el agua pura donde se marcará cero; 2°. el punto de flote en el ácido sulfúrico concentrado, donde se marcará 66. Se continuará la graduación como precedentemente. Este método rápido sirve con frecuencia á los constructores.

132. **Areómetro de Cartier.** — En la administración francesa se ha usado mucho tiempo, como pesa-espíritus, el areómetro de Cartier, que se reducía á un areómetro de Baumé cuya graduación había sido ligeramente modificada, ó más bien alterada por Cartier, con propósitos de competencia comercial. Conservaba el grado 10 para el punto de flote en el agua pura, y establecía á partir de éste una división arbitraria en grados iguales, sin tomar segundo punto fijo ninguno. El grado 29 de esta escala coincidía aproximadamente con el 31 del areómetro Baumé. Á la escala de este instrumento se refieren las denominaciones usuales de alcoholes á 25° á 30°, á 40° y de aguardientes á 19°, á 20°, á 22°; pero tienden á desaparecer cada vez más, dejando el puesto á las indicaciones del alcoholímetro centesimal.

133. **Alcoholímetro centesimal de Gay-Lussac.** — *Definición.* — El *alcoholímetro centesimal* es un areómetro de peso constante, inventado por Gay-Lussac para medir la *fuerza* de los líquidos espirituosos á 15° C., es decir, el número de centésimos de alcohol puro, en volumen, que contienen estos líquidos á dicha temperatura.

Descripción y uso. — La forma del alcoholímetro es análoga á la del pesa-espíritus de Baumé (fig. 131); pero la graduación difiere, y es completamente empírica. La escala, sostenida por el vástago, está dividida en 100 partes, cada una de las cuales representa un centésimo de alcohol en volumen: el grado 0 corresponde al agua pura y el 100 al alcohol absoluto. Introducido en un líquido espirituoso á la temperatura de 15°, el alcoholímetro da inmediatamente su *fuerza*, porque la graduación se ha efectuado á esta temperatura. Por ejemplo, si á 15° el alcoholímetro penetra en un aguardiente hasta la divión 48, esto quiere decir que el licor contiene 48 centésimos de un volumen de alcohol puro y el resto de agua.

Graduación. — Se marca la escala del alcoholímetro introduciendo sucesivamente el instrumento en mezclas de alcohol y de agua hechas en proporciones conocidas, á la temperatura fija de 15°. Esta operación exige precauciones particulares, por causa del fenómeno siguiente.

Cuando se mezcla un volumen V de alcohol absoluto con un volumen V′ de agua pura, el volumen total V″, que debería ser igual á V + V′, es más pequeño que V + V′. Ha habido, pues, concentración; además, esta concentración es variable con los volúmenes V y V′ que están mezclados. La contracción es máximum para una mezcla de 52,3 partes de alcohol y de 47,7 de agua (en volumen) y entonces es igual á 3,65 por 100. Hay pues que tener cuenta de esto en la graduación.

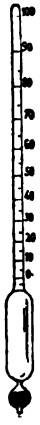


Fig. 131.

Al efecto se toma una probeta de pie, graduada en 100 partes iguales, y después de verter en ella alcohol absoluto hasta la división 95, se acaba llenándola hasta 100 con agua destilada: así se obtiene una mezcla en que hay ciertamente 95 por 100 de alcohol absoluto, y si se introduce en ella el instrumento, hay razón para marcar 95 en el punto de flote. Entonces se vacía la probeta, se echa dentro alcohol hasta 90 y se acaba otra vez llenando con agua destilada hasta 100: esto da evidentemente una mezcla que contiene 90 por 100 de alcohol absoluto; es pues, lícito marcar 90 en el punto de flote del alcoholímetro en la mezcla. Del mismo modo se determinan todos los grados, de 5 en 5, desde 90 hasta la división 5. Por fin se marca 100° en el alcohol absoluto y 0° en el agua pura; divídense en cinco partes iguales cada uno de los intervalos de 5 en 5, y el instrumento queda graduado.

Observaciones. — 1°. Importa observar que habiendo sido graduado á 15° el alcoholímetro de Gay-Lussac, sólo son exactas sus indicaciones á esta temperatura. Á otras más altas ó más bajas, los líquidos alcohólicos se contraen y se hacen por consiguiente más ligeros ó más densos, de modo que el instrumento penetra en ellos cada vez más, no obstante ser la misma su riqueza alcohólica. Entre 0° y 30° C, el error cometido de este modo puede llegar hasta 30 por 100 de la fuerza del licor.

Tabla de corrección. — Este error puede enmendarse por medio de una tabla de corrección hecha por Gay-Lussac. Es una tabla de doble entrada, que contiene en una columna vertical las temperaturas de cero á 30° y en otra horizontal los grados del alcoholímetro de cero á 100. Por ejemplo, estando un aguardiente á la temperatura de 22°, y marcando en él 36 el alcoholímetro, la tabla indica que la riqueza real del licor es 33: quiere decir que contiene los 33 centésimos de su volumen de alcohol y, por consiguiente, 67 centésimos de agua.

Fórmula de corrección. — También se puede efectuar esta corrección utilizando una fórmula empírica que comprende todos los números inscritos en la tabla. Llamando x al grado que se busca, n al grado observado á la temperatura de la experiencia $(15 + \theta)$, y b á un coeficiente, que es igual á 0,4, se tiene

$$x = n - b\theta.$$

Si la temperatura del experimento es igual á 15°, se comete un error por defecto, y la corrección debe ser negativa. El grado corregido x es entonces

$$x = n + b\theta.$$

134. **Extensión de la graduación centesimal á los pesa-sales, pesa-leches, pesa-vinos y pesa-orinas.** — También se construyen pesa-sales graduados con arreglo

al principio del alcoholímetro centesimal. Estos instrumentos permiten determinar inmediatamente la cantidad de tal ó cual sal que existe en una disolución dada. Su cero corresponde siempre al agua pura. Márcanse sucesivamente, 5, 10, 15, 20.... en los diferentes puntos de flote en disoluciones que contienen 5, 10, 15, 20... partes de sal; después se divide cada intervalo en 5 partes iguales.

Este modo de graduación presenta un inconveniente : es que se necesita un pesa-sales especial para cada especie de sal. Por ejemplo, un instrumento que hubiera sido graduado para el nitrato de potasa, daría indicaciones completamente falsas en una disolución de carbonato de potasa ó de cualquier otra sal.

Constrúyense según el mismo principio *pesa-leches* y *pesa-vinos*, destinados á medir la cantidad de agua que se ha podido introducir por fraude en estos líquidos; pero estos instrumentos no presentan real utilidad, porque como las densidades de la leche y del vino son muy variables, aun cuando estas sustancias son perfectamente naturales, podría atribuirse á una falsificación lo que se debería únicamente á la mala cualidad natural de la leche ó del vino. Algunos médicos usan también un *pesa-orinas*, que se funda en el mismo principio.

135. **Graduación por comparación.** — Es inútil repetir con todos los areómetros centesimales de la misma categoría, por ejemplo con todos los alcoholímetros, la serie de operaciones que exige la graduación de Gay-Lussac; basta con marcar empíricamente, por el método indicado, un tipo de cada especie; después se gradúan los demás por comparación.

Principio del método. — Este método de graduación se funda en el hecho de que *las escalas de dos alcoholímetros* (ó de dos areómetros centesimales de la misma especie) *son semejantes*. Esto quiere decir que el *cociente de las capacidades* u y u_1, que corresponden á la longitud de un grado en cada escala, es un número constante.

Este hecho es una consecuencia directa de las condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes. En efecto, sean dos areómetros de pesos P y P_1, que suponemos graduados ambos por el método de Gay-Lussac : estos dos aparatos deben marcar el mismo grado N cuando se les introduce en un mismo líquido de densidad d. La ecuación de equilibrio será,

para el primero $$P = Nud.$$

y para el segundo $$P_1 = Nu_1d,$$

Dividiendo estas dos ecuaciones miembro á miembro, resulta

$$\frac{P}{P_1} = \frac{u}{u_1}.$$

Como el cociente de los grados $\frac{u}{u_1}$ es constante para dos instrumentos de pesos P y P_1, resulta necesariamente que las dos escalas son semejantes.

Operación. — La graduación se practicará muy sencillamente utilizando esta semejanza, aunque sin embargo con la condición de suponer perfectamente calibrados los vástagos de los aparatos, pues entonces la división en partes de capacidades semejantes se reducirá á una división en trozos de longitudes análogas. Se empezará por trasladar la escala AA del tipo á una hoja de papel (fig. 132), y después se traza desde un punto cualquiera I un sistema de transversales que van hasta los diversos grados de la escala tipo. Esta construcción gráfica preliminar servirá para la graduación de todos los instrumentos de especie análoga.

Hay que determinar directamente para uno cualquiera de esos aparatos el grado O y después el n, introduciéndolo sucesivamente en el agua pura, y luego en una disolución que marca n en el areómetro tipo. Sea ab este intervalo (O—n) en el instrumento que se trata de graduar; tiene una capacidad igual á nu_1; análogamente, el intervalo (O — n) del tipo tiene una capacidad igual á nu : comparando estos dos intervalos $\frac{nu}{nu_1}$, se tendrá el cociente de semejanza buscado $\frac{u}{u_1}$. Esta comparación se efectúa gráficamente del modo que sigue. Bús-

case en la hoja de papel una paralela A' A' á AA, que tenga entre las transversales Io é In una longitud igual precisamente á *ab* : esta paralela A' A' será

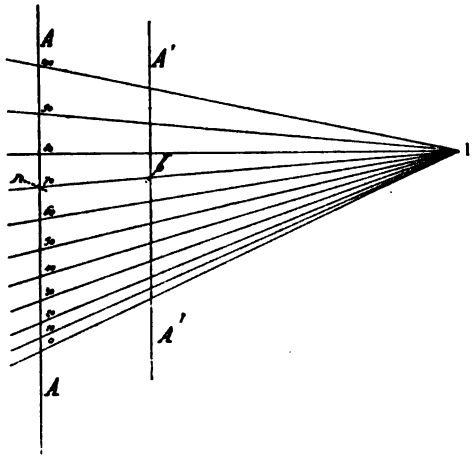


Fig. 132.

dividida por el sistema de transversales en partes proporcionales al cociente $\frac{u}{u_1}$, y representará exactamente la *escala buscada*.

136. **Densímetros y volúmetros.** — 1°. *Definición.* — Llámanse así unos areómetros de peso constante graduados racionalmente, de manera que indiquen de golpe, sea las *densidades* de los líquidos en que se les introduce, sea sus *volúmenes específicos*, quiere decir, los *volúmenes de la unidad de peso* de estos líquidos. Estos instrumentos fueron inventados por Gay-Lussac. Su forma es análoga á la de los areómetros de Baumé; pero importa mucho que sus vástagos estén perfectamente calibrados, esto es, que tengan el mismo grueso en todos sus puntos.

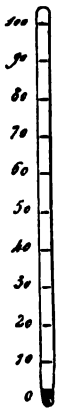


Fig. 133.

2°. *Principio de la graduación.* — Supongamos que se marquen 100 en el punto de flote del instrumento (fig. 133) en el agua pura á 4°. Este punto se considera como el 100° grado de una división en partes de igual capacidad, cuyo cero estuviese en la parte inferior del instrumento; supónese que éste es perfectamente cilíndrico, de modo que las partes de igual longitud tengan la misma capacidad. Sea u el volumen de una división, y P el peso total del instrumento; se tiene evidentemente

[1] $$P = 100\,u.$$

Si se introduce el aparato en un líquido cualquiera, de densidad x, y que penetra en él hasta el grado N, se tendrá

[2] $$P = Nux.$$

Luego : 1°. El volumen acupado por un peso P del líquido será Nu y el *volumen específico* y del líquido estará dado por la ecuación

$$y = \frac{Nu}{P} = \frac{Nu}{100\,u} = \frac{N}{100};$$

2°. La densidad del líquido estará dada por la ecuación

$$100\,u = Nux, \quad \text{de donde} \quad x = \frac{100}{N}.$$

Observación. — Si en vez de agua pura á 4° se hubiera tomado agua pura á t°, según se hace de ordinario, no habría más cambios que la introducción del factor e, densidad del agua, en la ecuación [1] y en sus consecuencias. Tendríamos

$$P = 100\,ue \quad \text{y} \quad x = \frac{100\,e}{N}, \quad y = \frac{100\,e}{N}.$$

3°. *Diferencia entre los densímetros y los volúmetros.* — Estos instrumentos graduados así indican pues á primera vista el *volumen específico* de los líquidos. Por el contrario, para obtener la *densidad* de éstos se necesita efectuar un cálculo. Se transforma el volúmetro en densímetro efectuando de antemano el cálculo para todos los grados de la escala volumétrica, é inscribiendo frente á cada grado la densidad correspondiente.

APLICACIONES DIVERSAS.

137. **Nivel de agua.** — *Principio y descripción.* — El *nivel de agua* es un instrumento de agrimensura, cuya construcción se funda en las condiciones de equilibrio de un líquido contenido en vasos comunicantes Compónese de un tubo de latón ó cobre, acodillado en sus dos extremos; en éstos se encuentran adaptados dos tubos de

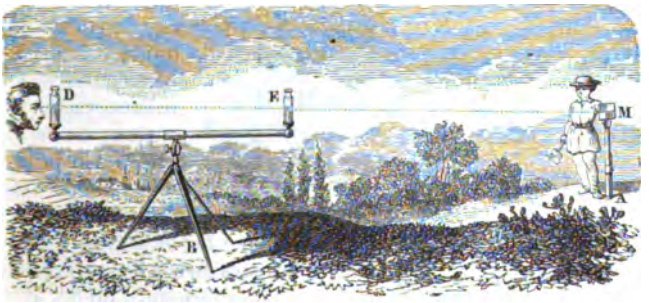


Fig. 134.

vidrio D y E (fig. 134), donde se echa agua á que se ha dado color, hasta las 3/4 partes próximamente de su altura. El aparato entero se dispone horizontalmente sobre un trípode. Una vez establecido el equilibrio, las superficies libres del líquido en D y E se encuentran en un mismo plano horizontal, conforme á lo ya demostrado.

Usos. — Este instrumento sirve para *hacer nivelaciones*, quiere decir para determinar la *diferencia de niveles* entre dos puntos ó, dicho de otro modo, su distancia vertical.

Supongamos que se trate de saber á qué altura sobre un punto A del terreno se encuentra otro punto B. Colócase en el primero una *mira*, que consiste en una regla de madera, formada de dos correderas, y terminada en una placa de latón M, que tiene en su centro un punto de referencia. Dispuesta la mira verticalmente en A, un observador colocado junto al nivel dirige tangencialmente á las superficies D y E un rayo visual hacia la mira y hace seña al ayudante que la mantiene de alargarla ó acortarla hasta que el punto de referencia se encuentre en la línea DE. Transportando entonces la mira al punto B se repite la misma operación. La distancia entre la primera y la segunda posición del punto de referencia indica la altura entre A y B.

También se puede operar colocando el nivel en un sitio intermedio y dirigiendo desde allí el rayo visual hacia dos miras colocadas en los dos puntos. La diferencia de las alturas en las dos ojeadas expresa la distancia vertical de los dos lugares que se consideran.

Nivelación simple y nivelación compuesta. — Una cualquiera de estas operaciones constituye la *nivelación simple*. Bastan en todos los casos en que los dos puntos están bastante cerca para que se pueda dirigir con precisión el rayo visual. Si los puntos están muy lejos, se establecen estaciones intermedias y se procede por nivelaciones sucesivas. La diferencia de nivel buscada es la suma de las nivelaciones parciales. Esta operación se llama *nivelación compuesta*.

138. **Nivel de burbuja de aire.** — *Descripción, arreglo y usos.* — El *nivel de burbuja de aire* es un instrumento de precisión que se funda en la condición de equilibrio de un líquido y de un fluido superpuestos en el mismo vaso.

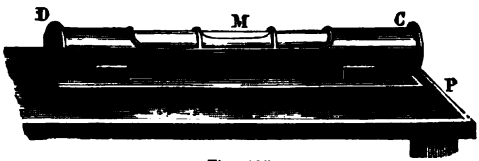


Fig. 135.

Consiste en un tubo de vidrio apenas ensanchado en su punto medio, que se llena de un líquido muy fluido, como el alcohol ó el éter, conservando dentro una pequeña burbuja de aire (fig. 135). Cerrado este tubo soldándolo con la lámpara en sus dos extremidades, se le coloca en un estuche de latón CD, que presenta un ancho corte por donde se ve la graduación hecha en la parte superior sobre el vidrio. El tubo metálico se fija ordinariamente en una regla del mismo metal, muy bien trabajada, que sirve de peana al instrumento.

Poniendo el nivel sobre un plano cualquiera, apenas quedan en equilibrio los dos fluidos interiores, su superficie de separación, que es la del líquido, queda perfectamente horizontal y la burbuja de aire va á colocarse en la parte más alta del tubo. Como la línea ideal que une sus extremidades es una recta de la superficie de separación, también es una línea horizontal, sea cual fuere la orienta-

ción del plano de apoyo. Esa línea divide á la escala graduada del vidrio, en dos partes, variables con la orientación del plano de apoyo. Pero si este plano es horizontal, la burbuja de aire va á colocarse entre dos marcas que entonces definen una línea horizontal: estas dos marcas serán siempre las mismas cada vez que el nivel esté en un plano horizontal, constituyendo por tanto dos puntos de referencia fijos *b* y *b'* (fig. 136), donde se marca ordinariamente 0 0. La línea *bb'* ó 0 0 se llama la *línea de nivel.*

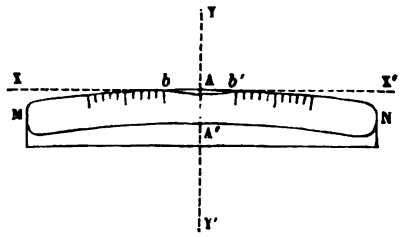


Fig. 136.

Arreglo del nivel. — Se dice que un nivel de burbuja de aire está *arreglado* cuando la mencionada línea es *paralela á la base del instrumento.* El arreglo es una cosa que debe hacer el operador, repitiéndola varias veces antes de servirse del aparato. He aquí en qué consiste.

1°. Se examina primero si el nivel está ó no arreglado. Para ello se le coloca en un plano fijo casi horizontal y después se busca por tanteos una posición en que la burbuja vaya á colocarse entre las dos marcas de referencia. Entonces se vuelve el instrumento punta por punta sin cambiarlo de sitio. Si está arreglado, la burbuja vuelve á colocarse entre los puntos ya dichos.

En efecto, sea MN la base del nivel y *bb'* la línea de los puntos de referencia. Cuando se vuelve el nivel punta por punta, efectúa un movimiento de rotación en torno del eje YY', perpendicular al plano de la base MN : el punto M va á N

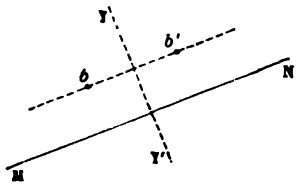


Fig. 137.

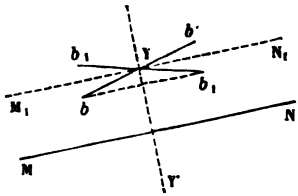


Fig. 138.

y recíprocamente (fig. 137). Si la línea *bb'* es paralela á la base, será perpendicular al mismo eje y ejecutará en torno suyo un movimiento de rotación : el punto *b* irá á *b'* y recíprocamente. Cuanto á la burbuja, no ha cambiado de posición en el movimiento, porque está obligada á ocupar siempre los puntos más elevados del tubo ; se encontrará pues en la misma posición relativamente á los puntos de referencia.

2°. Supongamos, por el contrario, que la línea de los puntos de referencia sea oblicua respecto de MN, quedando por ejemplo en la posición *bb'* (fig. 138). La vuelta del instrumento la pondrá en otra posición b_1 b_1', simétrica respecto del eje de rotación YY'. La burbuja no ha cambiado de lugar : por tanto forma un ángulo *b* Y b'_1 con la nueva posición de la línea de los puntos de referencia, ángulo doble del que esta línea forma con la MN. Luego, inclinando el nivel

respecto de su plano el ángulo $N_1 Y b_1 = \frac{1}{2} b Y b_1'$, se obtendrá el paralelismo de bb' y de MN, y el nivel queda arreglado.

Este resultado se puede obtener siempre por tanteos. En los niveles de precisión, la armadura metálica es móvil en torno de un eje O. La otra extremidad O'

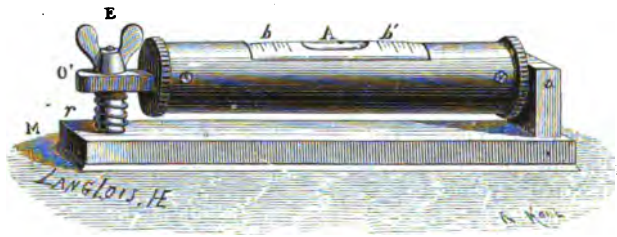


Fig. 139.

atraviesa libremente un tornillo fijo en la peana MN. Un resorte r tiende á impulsar esa extremidad de abajo arriba, pero una tuerca móvil E (fig. 139) la mantiene en una posición fija.

Usos del nivel de burbuja de aire. — El instrumento una vez arreglado de este modo, puede servir para las tres operaciones siguientes:

1°. Poner horizontal un plano ó un eje;

2°. Medir la inclinación de una recta dada;

3°. Hacer vertical un eje.

1°. Cuando el nivel debe aplicarse sobre un eje horizontal, se le sostiene con dos horquillas que pueden adaptarse á dos topes del mismo diámetro. Veremos esta disposición en el catetómetro y al describir el modo de arreglar este instrumento, haremos ver el empleo del nivel para dar la horizontalidad á un eje.

Cuando el nivel debe servir para hacer horizontal un plano, su armadura presenta base horizontal que se coloca sobre una recta

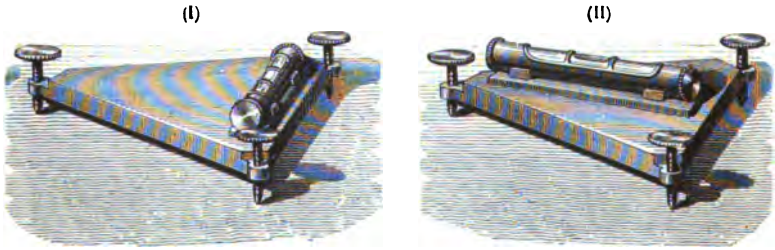


Fig. 140.

cualquiera del plano. Éste es de ordinario un trípode en forma de triángulo, provisto de tres tornillos de nivel (fig. 140). Empiézase por disponer el instrumento paralelamente á la dirección de las

cabezas de los tornillos (fig. 140, I) y se da vueltas á éstas hasta que la burbuja vaya á colocarse entre sus líneas de referencia : en este momento la base del nivel y, por consiguiente, la línea del plano de apoyo, que coincide con la base, es una horizontal. Hecho esto, se pone el nivel en una posición sensiblemente perpendicular á la primera (fig. 140, II), y se hace horizontal esta dirección dando vueltas al tercer tornillo del plano. Si esta segunda operación no ha alterado la horizontalidad de la línea de los otros dos tornillos, puede deducirse que el plano es horizontal, toda vez que contiene dos líneas horizontales. Pero en general la primera horizontal se ha inclinado más ó menos durante la segunda operación. Entonces se empieza de nuevo la primera operación y luego la segunda, metódicamente, hasta que el resultado de una de ellas no se altere por efecto de la otra, y así se llega con bastante rapidez á la horizontalidad permanente de las dos direcciones : entonces el plano de apoyo es *horizontal*.

2º. Para medir la inclinación de una recta ó de un plano inclinados sobre el horizonte, hay que conocer el valor angular de una división de la escala del nivel. Efectúase esta graduación previa de manera empírica, con ayuda de un aparato especial que se llama *comparador de nivel*. Este aparato se compone de un plano móvil en torno de un eje horizontal, y cuya inclinación puede modificarse cantidades conocidas á voluntad, comunicándole su movimiento por medio de un tornillo micrométrico vertical, provisto de un tambor graduado como el del esferómetro.

3º. Veremos por fin al hablar del catetómetro como sirve el nivel para hacer vertical un eje.

139. **Aguas corrientes. — Saltos de agua. — Pozos artesianos.** — Los mares, las fuentes y los ríos son grandes vasos comunicantes en que las aguas tienden incesantemente á tomar el mismo nivel. Lo mismo ocurre con los saltos de agua artificiales y de los pilares públicos.

La figura 141 basta para dar idea clara de la teoría de estas aplicaciones naturales ó industriales. Si se echa agua en una de las ramas del tubo de forma de U (I), el líquido sube en la otra, y cuando se establece el equilibrio, los niveles *a* y *b* se encuentran á la misma altura. Supongamos ahora que el tubo tenga ramas desiguales (II), hallándose en lo alto de la mayor un depósito lleno de agua y teniendo la menor una llave. Si ésta se encuentra cerrada por de pronto y si el nivel en la rama grande supera en la altura *cd* al de

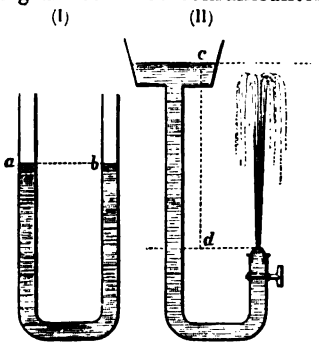


Fig. 141.

la rama pequeña, el líquido ejercerá sobre la llave una presión equivalente al peso de una columna líquida que tiene por altura *cd* y por base la sección de la rama menor. De modo que si se abre la llave, el agua saltará verticalmente, en virtud de esta presión. La altura del chorro debería ser igual á *cd*, pero la disminuye más ó menos la resistencia que oponen al movimiento ascensional del agua primero el roce del líquido contra las paredes del tubo y en segundo lugar la masa de aire desalojada por el chorro.

El mismo principio se aplica á la teoría de los *pozos artesianos*[1], que son fuentes artificiales, de aguas que generalmente forman saltos.

Los pozos son agujeros muy estrechos, practicados con la sonda, y de profundidad variable, que penetran hasta una capa de agua subterránea contenida entre otras dos impermeables. Obsérvese, en efecto, que los terrenos que componen la corteza terrestre son, unos permeables á las aguas, como las arenas y los pedregales, y otros impermeables, como las arcillas. Supongamos, pues, una cuenca geográfica H, más ó menos extensa, debajo de la cual se encuentren

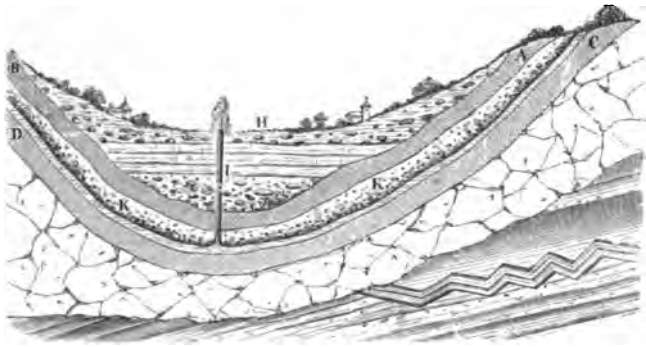


Fig. 142.

dos capas impermeables, AB, CD (fig. 142), que comprendan entre sí una capa permeable KK : si esta última se encuentra en comunicación con terrenos más elevados, á través de los cuales se filtren las aguas de las lluvias, el líquido seguirá la pendiente natural del terreno á través de la capa permeable y se acumularán en el fondo de la cuenca geográfica. Allí se reunen sin poder comunicar con la capa superficial, de que están separadas por la capa impermeable AB. Pero si se practica á partir de la superficie del suelo un agujero que atraviese la capa superior, las aguas se elevan por él, pues siempre

1. Se les llama así porque los practicaron primeramente en la antigua provincia francesa de Artois. Hay allí algunos que parecen ser de fines del siglo XII. Los chinos y los egipcios conocieron estos pozos en edades ya muy remotas.

tienden á ponerse á nivel, hasta una altura tanto mayor cuanto más alto sea el terreno de donde proceden. Y en efecto, se ha observado que el nivel hidrostático[1] de un pozo perforado no es invariable, sino que sube ó baja según los movimientos de las aguas corrientes de la región donde la capa permeable toma el líquido.

Pozos artesianos de Grenelle y de Passy (París). — Las aguas que alimentan los pozos artesianos proceden algunas veces de veinte y treinta leguas de distancia. Cuanto á la profundidad, varía con las localidades. El pozo perforado de Grenelle tiene 548 metros de profundidad; el agua que sale de él posee en toda época una temperatura de 27° y su nivel hidrostático es de unos 33 metros. El de Passy tiene 570 de profundidad y da agua á 20°. Estos dos pozos son alimentados por una misma capa de arena acuífera, sobre la que hay masa considerable de rocas y que no llega á la superficie del suelo sino en la altura de la meseta de Langres. Por consiguiente en la extensión de esta meseta es donde se encuentra el depósito de alimentación de los dos pozos (análogo al de la figura 141 II).

1. Se llama *nivel hidrostático de un pozo* perforado la altura á que se eleva el agua del pozo en el tubo mismo que ha servido para la perforación. Déjase este tubo en el agujero como conductor, para impedir pérdidas del agua á través de las capas permeables del corte.

LIBRO IV

NEUMÁTICA

CAPÍTULO PRIMERO

ESTÁTICA DE LOS GASES.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y BARÓMETROS.

140. **Caracteres físicos y propiedades de los gases.** — Llámase *gases* ó *cuerpos gaseosos* á todas las sustancias que en las condiciones atmosféricas ordinarias se presentan en el tercer estado físico ó *estado gaseoso*, ya definido. El aire es el tipo de los gases [1].

Sus propiedades características son la *fluidez*, la *gravedad*, la *elasticidad*, — que les son comunes con los líquidos, — la *compresibilidad* y la *expansibilidad*.

Peso de los gases. — *Los gases son pesados* como los líquidos y como todos los demás cuerpos. Esta proposición, que tan evidente parece hoy, fué sospechada apenas por los antiguos [2] y no se demostró experimentalmente hasta Galileo. Éste probó el peso del aire comprimiendo el fluido en un recipiente que en consecuencia aumentó de peso [3]; el aumento indica evidentemente el peso del exceso de aire introducido.

También se demuestra el mismo fenómeno mediante un experimento inverso, que se debe á Otto de Guericke. Cuélgase del fiel de una balanza muy sensible un matraz de vidrio de 3 á 4 litros, cuyo cuello tiene una buena llave. Se pesa primero el matraz lleno de aire y después se hace el vacío, observándose entonces que se ha roto el equilibrio. Para restablecerlo se añaden al lado del matraz algunos gramos, que representan evidentemente el peso del aire extraído.

1. Por lo menos en el orden físico, pues desde Lavoisier se sabe que este cuerpo no es un gas siempre, sino una mezcla de dos primitivos, el oxígeno y el nitrógeno.
2. Aristóteles dice en su tratado *Del Cielo* : « Cuando los cuerpos están en su propio lugar tienen todos peso, excepto el fuego. Hasta el aire es pesado. »
3. Galileo, *Diálogo de las ciencias naturales*, primera jornada.

Es posible operar de otra manera. Se empieza por hacer el vacío en el matraz y después se le pesa vacío, teniendo cuidado de poner previamente algunos gramos en el platillo del mismo lado. Entonces se abre la llave ; el aire penetra en el matraz con un silbido característico y el fiel se inclina hacia esa parte. Restablécese el equilibrio quitando cierto número de gramos, que representan evidentemente el peso del aire que ha entrado de nuevo en el matraz [1].

Elasticidad y compresibilidad de los gases. — Eslabón de aire. — Los gases son perfectamente elásticos, en el mismo grado que los líquidos; pero son incomparablemente más compresibles que éstos. Las dos propiedades pueden ponerse de manifiesto con ayuda de la misma experiencia, la del *eslabón atmosférico* ó *eslabón de aire.* Consiste en hacer penetrar un émbolo de cuero en un recipiente de vidrio, de forma de probeta de pie, donde baja rozando suavemente las paredes (fig. 143). La pequeña masa de aire allí contenida se comprime á medida que el émbolo avanza y se reduce á volumen tan pequeño como se quiere — lo que prueba su gran compresibilidad; pero así que se deja de apretar, la masa se dilata y empuja al émbolo hasta el orificio del recipiente, — lo cual prueba su gran elasticidad.

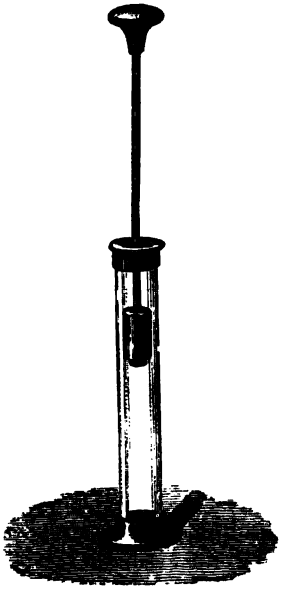


Fig. 143.

Cuando se opera muy bruscamente, la compresión del gas va acompañada de un desprendimiento de calor, que puede llegar hasta inflamar un pedazo de yesca colocado en el fondo de la probeta : por eso se da á este aparatito el nombre de *eslabón de aire.*

Expansibilidad de los gases. — Fuerza elástica. — Los gases son eminentemente *expansibles*, quiere decir que tienden siempre á tomar volumen mayor y á ocupar todo el espacio que tienen delante. La *expansibilidad* es su propiedad más característica ; se la demuestra por la experiencia siguiente.

Colócase debajo del recipiente de la máquina neumática una vejiga, provista de una llave y que se oprime antes con las manos á fin de expulsar de ella casi todo el aire, ú otro gas cualquiera, que contiene (fig. 144, I). Debe tenerse la precaución de mojar sus paredes

1. Estas experiencias dan aproximadamente 1, 3 g. como peso del litro de aire, tomado en las condiciones ordinarias.

para hacerlas más flexibles. Primero hay equilibrio entre la presión del aire del recipiente y la fuerza de expansión del aire contenido en la vejiga; pero desde que se hace el vacío, la presión exterior se debilita, y la vejiga va inflándose cada vez más como si se soplara

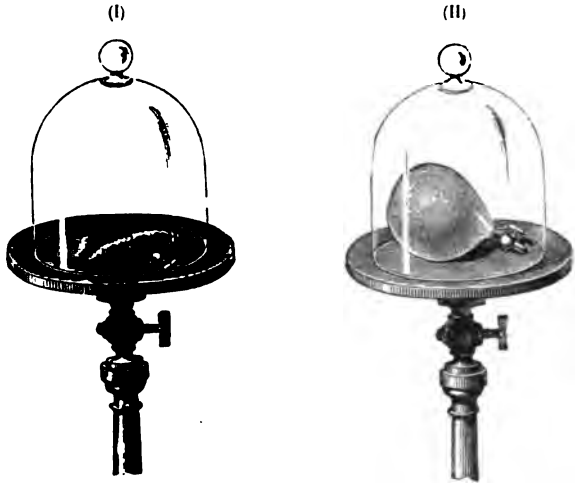


Fig. 144.

dentro de ella (fig. 144, II), lo cual prueba la expansibilidad del gas que contiene. Cuando después se hace penetrar el aire exterior en la campana, se ve que la vejiga, comprimida por el gas entrante, recobra su volumen primitivo : lo cual es una nueva prueba de la elasticidad de los gases.

La hinchazón de la vejiga por el gas que se dilata pone en evidencia una fuerza molecular que resulta de la expansibilidad de los gases : esto es lo que se llama su *fuerza elástica*.

Objeto de la Neumática. — El estudio de estas diversas propiedades de los gases, la manifestación experimental de los fenómenos que de ellas resultan y la determinación de las leyes que los rigen constituyen la parte de la Física llamada *Neumática*.

141. **Estática de los gases.** — Algunos de los principios de la hidrostática pueden aplicarse al caso de los gases pesados y constituyen una *Estática* de los gases.

1°. *Principio de Pascal aplicado á los gases.* — Dada una masa gaseosa en equilibrio en un recipiente cerrado, si se hace abstracción de su peso y de su fuerza elástica, el principio de *la igualdad de presión* le es rigurosamente aplicable. Puede enunciársele de la misma manera que en el caso de los líquidos (96).

2°. *Condiciones de equilibrio de los gases pesados.* — Sería fácil de-

mostrar *a priori*, tanto para los gases como para los líquidos graves, el teorema fundamental sobre *la diferencia de las presiones en dos puntos de la masa situados á niveles diferentes* (102). Las condiciones de equilibrio de los gases pesados (por lo menos las que les son aplicables) se deducen rigurosamente de este teorema fundamental y cabe enunciarlas de la misma manera que para los líquidos (104).

Observación. — *Caso de dos ó de más gases.* — Las condiciones generales (1°.) y (2°.) son las únicas aplicables; pues por causa de la expansibilidad de los gases no puede haber ni superficies libres, ni superficies de separación, ni superposición por orden de densidades. En este caso se produce una mezcla íntima de los gases heterogéneos, así como una igualación de la fuerza elástica, que constituyen el fenómeno llamado *difusión de los gases.*

3.° *Presiones en los gases pesados en equilibrio. — Presión atmosférica.* — Las presiones que podemos llamar estáticas y que resultan de la gravedad, son despreciables cuando se trata de una masa gaseosa contenida en un vaso cerrado, comparándolas con su fuerza elástica, que es igual á la presión exterior. Las diferencias de presión resultantes de la diferencia de los niveles no se manifestarían claramente más que en el caso de un recipiente de dimensiones considerables. Tal ocurre con la atmósfera terrestre, en el seno de la cual vivimos como en el fondo de un inmenso océano fluido. La presión y fuerza elástica del aire son en ella sensiblemente constantes para todos los puntos de un mismo plano horizontal (en un mismo lugar del globo) y varían dado un mismo punto en razón inversa de la altura: este fenómeno es lo que se llama *presión atmosférica.*

142. **Estudio de la presión atmosférica.** — 1.° *Definiciones.* — Se llama *atmósfera* [1] á la capa de aire que envuelve por todas partes el esferoide terrestre y que es arrastrada con éste en su doble movimiento por el espacio.

Los cálculos aproximados de la altura de la atmósfera hechos por distintos métodos, han dado resultados muy diferentes. Los números varían desde 70 kilómetros hasta 340. Admitiendo el límite mínimo, se ve que la profundidad media de este océano fluido es diez veces superior á la de los mares más profundos. Así, no obstante la escasa densidad del aire, el peso total de la atmósfera es casi idéntico al de 581.000 cubos de cobre que tuvieran 1 kilómetro de lado.

2° *Demostración experimental de su existencia.* — Concíbese, pues, que la atmósfera debe ejercer en la superficie del globo presión considerable. Su existencia se demuestra de ordinario por los siguientes experimentos.

Experimento del rompe-vejigas. — El *rompe-vejigas* consiste en un cilindro de vidrio cerrado herméticamente en su parte superior por una membrana de badana, ó de vejiga. El otro extremo, cuyos

1. De ἀτμός, vapor, y σφαῖρα, esfera.

bordes están bien trabajados y se untan con sebo, se aplica sobre la platina de una máquina neumática (fig. 145). Apenas se empieza á extraer el aire, la membrana se deprime bajo la presión atmosférica que soporta y no tarda en romperse con estrépito, que se debe á la entrada súbita del aire.

Fig. 145.

Experimento de los hemisferios de Magdeburgo. — Este pequeño aparato clásico[1] consiste en dos hemisferios huecos, de latón, que tienen de 10 á 12 centímetros de diámetro (fig. 146, I). Sus bordes están provistos de un redondel anular de cuero, untado con sebo, que hace hermética la cerradura cuando se les pone en contacto. Uno de los hemisferios presenta una llave que se atornilla en la máquina neumática y el otro un anillo que sirve de puño por donde cogerlo y tirar de él. Mientras contienen aire, se les separa sin dificultad, pues hay equilibrio entre la fuerza elástica del fluido interior y de la

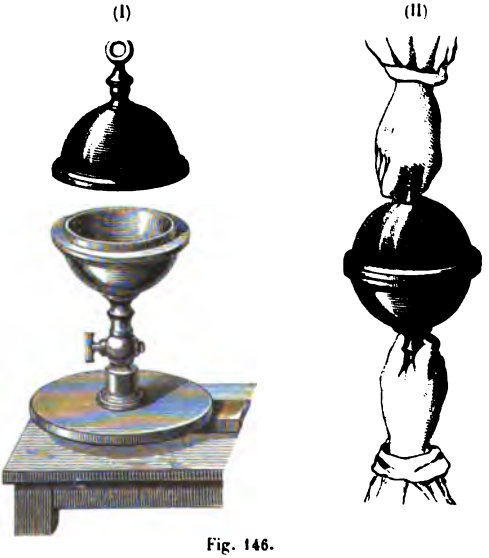


Fig. 146.

presión atmosférica; pero una vez hecho el vacío, ya no se puede

1. Lo imaginó Otón de Guericke, burgomaestre de Magdeburgo.

separarlos sin un esfuerzo poderoso, sea cual fuere la posición en que se les mantenga (fig. 146, II). Esto prueba, por otra parte, que la presión atmosférica se ejerce en todos sentidos.

143. Medida de la presión atmosférica : experimento de Torricelli. — Otro experimento, llevado á cabo en 1643 por Torricelli, discípulo de Galileo, mide también la presión atmosférica,

Experimento. — Se toma un tubo de vidrio de 80 centímetros de largo al menos, de 6 á 7 milímetros de diámetro y cerrado en uno de sus extremos. Colócasele verticalmente (fig. 147, I), y se le llena enteramente de mercurio ; cerrando después la abertura C con el pulgar, se le vuelve y se introduce la extremidad abierta en una cuba de mercurio (fig. 147, II). Entonces se retira el dedo y se ve que la columna mercurial baja en seguida hasta una altura AB, de 76 centímetros próximamente, donde permanece.

Fig. 147.

Teoría. — Torricelli tuvo el mé-

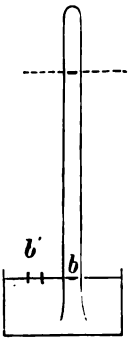


Fig. 148.

rito de explicar inmediatamente este curioso fenómeno, afirmando, y sosteniendo contra numerosos contradictores que lo que eleva el mercurio en el tubo y lo mantiene allí es la presión atmosférica. Nadie pone hoy en duda esta doctrina, que es consecuencia necesaria de los principios de la hidrostática.

En efecto, el tubo y la cubeta forman un sistema de dos vasos comunicantes, que contienen un líquido grave en equilibrio. La presión debe ser por tanto la misma en todos los puntos de una capa horizontal cualquiera. Consideremos en particular dos elementos de

superficie, *b'* y *b*, iguales á la sección del tubo, y tomados en el plano de la superficie libre del mercurio en la cubeta, uno dentro del tubo y otro fuera (fig. 148). Lo que se ejerce en el elemento *b'* es la presión atmosférica directamente, al paso que en el elemento *b* es el peso de la columna mercurial. Puede en consecuencia deducirse, con Torricelli, que la presión atmosférica equivale, dada igual superficie, al peso de una columna de mercurio de unos 76 centímetros de altura.

144. **Comprobación de Pascal.** — 1°. *Experimento del Puy de Dôme.* — De esta explicación resulta que *si el peso de la atmósfera aumenta ó disminuye, esto debe hacer subir ó bajar al mismo tiempo la columna de mercurio.* El único medio de disminuir, por decirlo así según se quiera, la presión que la atmósfera ejerce sobre los cuerpos, consiste en transportarlos á alturas más ó menos elevadas. Por esto rogó Pascal á su cuñado Périer, residente en Auvergne, que repitiera en el Puy de Dôme la experiencia de Torricelli. Périer observó lo que ocurría al pie de la montaña y en su cima, el mismo día, notando que la columna de mercurio elevada disminuía unos 8 centímetros, conforme á lo previsto por Pascal.

2° *Experimento de Ruen.* — Pascal previó otra consecuencia: *si lo que sostiene una columna mercurial de cierta altura en el tubo de Torricelli es la presión atmosférica, también sostendrá una columna más alta de un líquido menos denso.* Así lo demostró personalmente en Ruen, el año 1646, repitiendo la experiencia de Torricelli con vino encarnado en vez de mercurio. Tomó un tubo de 15 metros de largo cerrado por un extremo, lo llenó de vino tinto y lo levantó verticalmente en un depósito lleno del mismo líquido. Entonces observó que el vino se detenía á la altura de 10,40 m. *próximamente*, esto es *unas* 13,6 veces mayor que la del mercurio. Pues bien, siendo el vino tinto *unas* 13,6 veces menos denso que este líquido, el peso de la columna de vino era efectivamente igual al de la columna de mercurio de Torricelli.

145. **Valor de la presión atmosférica en kilogramos.** — La altura á que el mercurio permanece en equilibrio en el tubo de Torricelli suministra medios de calcular en kilogramos la presión de la atmósfera sobre una superficie dada. Supongamos, por ejemplo, que la columna tenga 76 centímetros y que la sección interior del tubo sea de 1 centímetro cuadrado. La presión que la atmósfera ejerce sobre 1 centímetro cuadrado, tomado en un punto cualquiera de la superficie libre del mercurio en la cubeta, es igual al peso de un cilindro de mercurio que tenga 1 centímetro cuadrado de base y 76 centímetros de altura, y por consiguiente un volumen de 76 centímetros cúbicos [1]. Ahora bien, como 1 centímetro cúbico de agua

1. Este es el significado de la expresión abreviada : *la presión atmosférica media es de 76 centímetros de mercurio.*

OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

pesa próximamente 1 gramo, 1 centímetro cúbico de mercurio debe pesar 13,6 gramos, de donde se deduce que el peso de la columna equivale á 13,6 × 76, es decir 1033 gramos. Tal es el valor de la presión atmosférica sobre 1 centímetro cuadrado.

Presión atmosférica en unidades C. G. S. — Atmósfera C. G. S. — Este peso de 1033 gramos por centímetro cuadrado haría en dinas $1033 \times 981 = 1{,}0136 \times 10^6$, es decir algo más de una *megadina*. Se ve, pues, que el peso de *una megadina* es muy parecido á la unidad ordinaria de presión atmosférica.

Se llama *unidad de presión atmosférica C. G. S.*, ó bien *atmósfera C. G. S.* á la presión que ejercería un peso de 1 megadina por centímetro cuadrado. Esta presión parece corresponder exactamente, *en París*, á una altura barométrica de 74,978 cm.

146. Clasificación de los barómetros. — Se llama *barómetros* [1] á unos instrumentos apropiados para medir la presión atmosférica. El tipo de ellos es el de cubeta, que viene á ser un tubo de Torricelli colocado en una cubeta de mercurio. Todos los buenos barómetros son perfeccionamientos del indicado; llámaseles *barómetros de mercurio*. Tales son: el *barómetro ordinario* ó de *cubeta*, el *barómetro de Fortin*, el *de sifón* ó *barómetro de Gay-Lussac*, el *barómetro normal* ó *de Regnault*, el *barómetro estático*, *barómetro de peso* ó *barógrafo*, que sirve, no sólo para valorar, sino también para inscribir las variaciones de la presión atmosférica en un punto dado.

También se construyen barómetros sin mercurio, llamados *barómetros aneroides* [2], ó *metálicos* por la materia con que se les hace. Describiremos el *de Vidi* y el *de Bourdón*.

147. Barómetro de cubeta. — Todo *barómetro de cubeta* se compone de un tubo de Torricelli lleno de mercurio, que penetra en una cubeta llena de este líquido y provisto de una escala graduada en milímetros, que permite valorar exactamente la altura de la columna elevada. Esta graduación se marca en el tubo mismo ó bien se aplica á lo largo de su superficie, de modo que el cero corresponda al nivel del mercurio en la cubeta.

Este instrumento tan sencillo presenta grave inconveniente: el nivel en la cubeta no es fijo, porque como la presión atmosférica aumenta ó disminuye, pasa cierta cantidad de mercurio de la cubeta al tubo ó inversamente. Ahora bien, siendo fijo el cero de la escala, la lectura del nivel en el tubo no indicará, en general, la verdadera altura barométrica. Con el fin de evitar ó de corregir el error de lectura, ha habido que imaginar diversas combinaciones, que complican más ó menos el barómetro primitivo de Torricelli.

Sea por lo demás el que fuere, tómase siempre como *altura barométrica la distancia vertical* del nivel en la cubeta al nivel del tubo. Por esto es indispensable que el aparato esté perfectamente vertical

1. De βάρος, peso, y μέτρον, medida.
2. De ἀ, partícula privativa, y νηρός, húmedo, mojado.

cuando se leen sus indicaciones: si al contrario se inclina, la columna de mercurio se hace mayor y el número marcado resulta demasiado grande (fig. 149).

148. **Barómetro de nivel invariable.** — El error debido á las variaciones del nivel en la cubeta será evidentemente tanto más *pequeño* cuanto *mayor* sección presente la cubeta. Pero no es posible agrandar ésta indefinidamente, por causa del peso enorme del mercurio que habría de emplearse. Así es que con frecuencia se utiliza una cubeta llamada de *nivel invariable* que presenta extensa superficie á pesar de contener escasa cantidad de mercurio.

Descripción. — La cubeta (fig. 150, sección y proyección) está dividida en dos partes, una esférica, llena de mercurio, en que penetra la extremidad del tubo

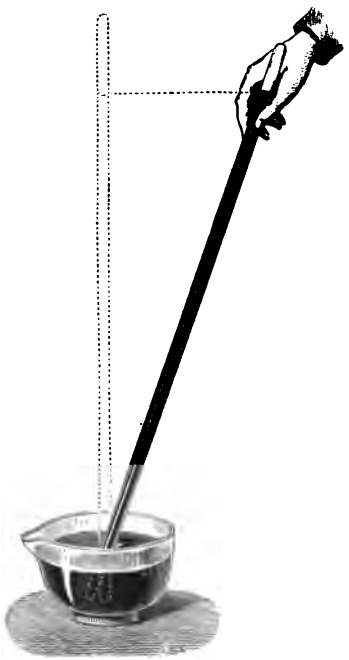


Fig. 149.

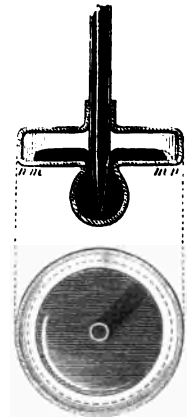


Fig. 150.

barométrico ; la otra, cilíndrica y de gran diámetro, permite al mercurio extenderse más ó menos sobre la pared *nn*. La cantidad total de mercurio es tal que, no obstante las variaciones de la presión, nunca alcanza la pared lateral de la cubeta *nn* y jamás vuelve totalmente al depósito esférico. Entonces, si la presión disminuye, pasa del tubo á la cubeta un poco de mercurio, pero el líquido no hace sino extenderse más, por ejemplo de *m* á *n*, aunque conserva sensiblemente el mismo nivel. Lo mismo ocurre cuando pasa de la cubeta al tubo una pequeña cantidad de mercurio. Sin embargo, así no se obtiene un nivel *rigurosamente* invariable.

149. **Barómetro de Fortin.** — 1°. *Principio y descripción.* — El órgano característico de este instrumento es una cubeta de *fondo móvil*, imaginada por el constructor Fortin. Consiste en un cilindro de vidrio cuyo fondo *mn* es una piel de gamuza, que puede levantarse ó bajarse por medio de un tornillo C colocado debajo (fig. 151).

Gracias á esta disposición se puede obtener un nivel constante en

la cubeta, haciendo cuando se quiere que la superficie libre *b* del mercurio llegue á un punto de referencia fijo *a*. Además, hay medio de hacer portátil el instrumento : al efecto se levanta la piel de gamuza y el mercurio con ella, hasta que el tubo y la cubeta queden completamente llenos. De esta manera el líquido y su envoltura forman como un trozo compacto; entonces se puede inclinar ó invertir el instrumento sin que el aire tenga posibilidad de penetrar en él y sin que el choque del mercurio contra el vidrio exponga á romper el instrumento.

Fig. 151.

2°. *Pormenores de construcción.* — El tubo E es estrecho (diámetro : 5 mm.) y la cubeta de pequeñas dimensiones (diám. : 5 cm.; alt. : 2 cm.) (fig. 151); ciérrala en su parte superior un disco de boj, fijo debajo de una tapadera de cobre M y atravesado por la punta de marfil *a*, que sirve de punto de referencia. El tubo E penetra por su punta afilada en el mercurio de la cubeta. Ésta y el tubo están unidos mediante la piel de gamuza *ce*, que se ata sólidamente por una parte en una garganta practicada en el tubo y por otra parte en *e*, á una abrazadera de cobre colocada en el centro de la tapa. Esta cerradura puede impedir la salida del mercurio, pero no se opone á la acción de la presión atmosférica.

El cilindro de vidrio *b* está pegado con mástic por su parte inferior con un cilindro de boj *zz* y en el contorno *ii* de éste es donde se ata muy bien la piel de gamuza *mn*. Esta piel va á unirse en su centro con un tope de boj *x*, que descansa en la punta del tornillo C. Cuando éste gira en un sentido ú otro, el tope sube ó baja llevando consigo el fondo *mn*.

La parte inferior de la cubeta está envuelta en un estuche de latón G, que va á unirse con la tapadera por medio de tres pernos de tornillo *k*,*k*,*k*. Análogamente, el tubo barométrico se coloca dentro de un estuche de cobre destinado á protegerlo (fig. 152). Este estuche presenta en su parte superior dos ventanas longitudinales, opuestas una á otra, que permiten ver el nivel del mercurio en A y cuyos bordes superiores definen un plano horizontal. Una de ellas lleva, grabadas en una arista, las divisiones en milímetros de la escala, que tiene su cero en el nivel constante marcado por la punta *a* de la cubeta. Es posible contar hasta décimos ó vigésimos de milímetro, con ayuda de un nonius (de décimos ó de vigésimos), sostenido por una corredera AB (fig. 153). Un botón dentado B, que en-

grana con una cremallera hecha en el otro borde de la ventana graduada sirve para hacer subir ó bajar la corredera.

3°. *Lectura del barómetro.* — Empiézase por instalar verticalmente el barómetro. Después se mueve el tornillo C de modo que suba el fondo de la cubeta, hasta que la superficie libre del mercurio se ponga en contacto con la punta de marfil *a* (fig. 151). Como la superficie metálica hace veces de espejo plano, el contacto se realiza *en el instante en que se tocan la punta y su imagen.* Si se pasa de ahí, otro fenómeno de reflexión lo advierte en seguida : siendo la punta algo roma y no mojándola el mercurio, el líquido se deprime en torno suyo y *aparece rodeada por una aureola luminosa.* Entonces se baja el tornillo para que descienda el nivel mercurial hasta que desaparezca la aureola.

Fig. 152.

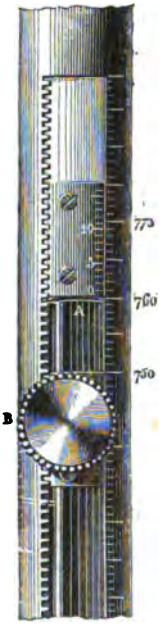


Fig. 153.

La altura del mercurio se lee con la corredera. Hácese que el plano horizontal de las ventanillas sea tangente con la superficie convexa del nivel mercurial : este contacto se realiza cuando un rayo visual, dirigido tangencialmente á los dos bordes de estas ventanillas, roza al mismo tiempo el menisco de la columna. Supongamos que el nonius de la corredera sea de décimos. Como la marca O coincide siempre con el plano horizontal de los bordes superiores, se encuentra entonces en el mismo plano del nivel. No habrá, pues, más que leer en la escala del plano barométrico el número entero de milímetros N, situado inmediatamente debajo de la marca O del vernier, y averiguar después cuál es la división *n* del nonius que coincide con otra de la escala. Entonces se tendrá la longitud *h* de la columna barométrica, *con aproximación de un décimo de milímetro.*

4°. *Errores.* — Hay primeramente errores comunes á todos los barómetros : más adelante veremos la manera de corregirlos. La temperatura es indicada por un pequeño termómetro (fig. 152) cuyo depósito penetra profundamente en el estuche.

Pero otra causa de error es propia del barómetro de Fortin : aludimos á la falta de coincidencia que puede existir entre el cero de la escala y la extremidad de la punta de marfil. Si hubiera coincidencia perfecta, la distancia entre la punta y una marca cualquiera *n* de la escala, medida con el catetómetro, sería igual á *n* milímetros. Si no, se hallará $n \pm \varepsilon$: esta cantidad ε representa la diferencia que existe, y habrá que corregir en ella todas las medidas ulteriores.

5°. *Usos del barómetro de Fortin.* — El barómetro de Fortin puede servir tanto de aparato fijo en los laboratorios como de barómetro para viajes.

I. *Barómetro fijo.* — En el primer caso se empieza por instalarlo en una pared ó en una tabla fuerte perfectamente vertical. Este soporte está provisto en su parte superior de un garfio donde se cuelga un pequeño anillo que hay en lo alto del estuche metálico ; y abajo tiene una ancha abrazadera metálica á través de la cual pasa libremente el depósito. Cuando el barómetro ha tomado por sí mismo la posición vertical, se le fija con tres tornillos de presión que sujetan el anillo.

II. *Barómetro de viaje.* — *Suspensión á la Cardan.* — Instálasele verticalmente por medio de un soporte particular llamado suspensión *á la Cardan*, por el nombre de su inventor

El estuche metálico del tubo se fija con dos tornillos de presión *a* y *b* (fig. 154) á una abrazadera de cobre X. Ésta tiene dos topes *oo* (únicamente uno de los cuales se ve en la figura), que giran libremente en dos agujeros practicados en otra anilla Y. Por fin, esta última tiene á su vez, en una dirección perpendicular á la de los topes *o*, *o*, otros dos análogos, *m* y *n*, sostenidos

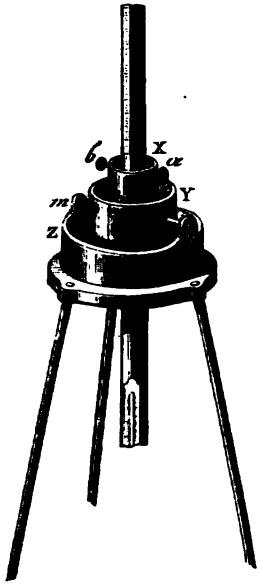


Fig. 154.

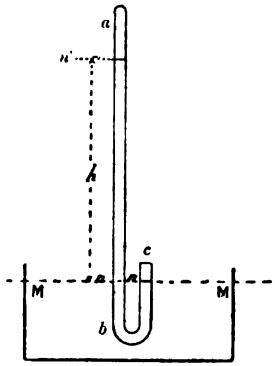


Fig. 155.

por el soporte Z. Gracias á esta doble suspensión puede oscilar libremente el barómetro en dos direcciones rectangulares alrededor de los ejes *oo* y *mn*, tomando por sí mismo una posición de equilibrio en que su eje de figura queda perfectamente vertical.

Observación. — La suspensión está mantenida generalmente por un trípode de madera, cuyas tres ramas articuladas son acanaladas, de modo que al reunirlas forman una especie de bastón hueco, que sirve para meter el barómetro y transportarlo.

150. **Barómetros de sifón.** — 1°. *Principio.* — Un *barómetro de sifón* consiste esencialmente en un tubo de vidrio *abc* (fig. 155), encorvado en dos ramas desiguales; la más pequeña está abierta, y la mayor, cerrada en su cúspide, está llena de mercurio como el tubo de un barómetro de cubeta : la altura barométrica se mide por *la distancia vertical de los niveles en las dos ramas.*

En efecto, sea *n* el nivel en la rama pequeña *bc*, y *n'* el nivel en la rama grande. Hallándose en equilibrio el líquido, la presión debe ser la misma en todos los puntos de un mismo plano horizontal, por ejemplo sobre el del nivel inferior. Ahora bien, en *n* (rama menor) se ejerce directamente la presión atmosférica, y en *n* (rama mayor), actúa el peso de la columna mercurial *nn'* : luego la altura de esta columna es precisamente la barométrica : con facilidad puede verse que resulta igual á la distancia vertical de los dos niveles *n*, *n'*.

2°. *Barómetro de Gay-Lussac.* — Esta forma de barómetro es muy antigua, pues ya Pascal la utilizó; Gay-Lussac le ha dado su nombre al introducir en su construcción notables mejoras (fig. 156).

Descripción. — Tomaba para formar las dos ramas dos pedazos de un mismo tubo perfectamente cilíndrico y las reunía por medio de

Fig. 156.

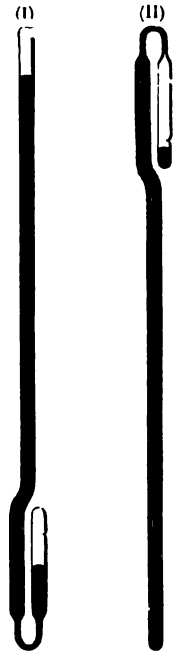


Fig. 157.

Fig. 158.

otro capilar (157, I). La rama pequeña está cerrada en su extremidad superior lo mismo que la grande de modo que no pueda entrar el polvo del aire, que ensuciaría el mercurio. Un agujerito cónico *i* (fig. 158), practicado lateralmente con una aguja enrojecida, basta para la penetración del aire y para que se transmita la presión atmosférica.

La altura barométrica se mide por medio de dos escalas que tienen su cero común en O (fig. 156), hacia la mitad de la rama mayor, y graduadas en sentidos contrarios, sobre dos reglas de cobre paralelas al tubo barométrico. Dos correderas de nonius, *m* y *n*, pueden deslizarse á lo largo de las escalas de modo que se calculen aproximaciones de *un décimo de milímetro*. La suma de los dos números representa la altura AB.

Usos. — El barómetro de Gay-Lussac puede servir, sea de baró-

metro fijo, sea para viajes. En el primer caso se le coloca en una tabla (fig. 156). Para llevarlo en viaje se empieza por volverlo (fig. 157, II) : la rama mayor se llena entonces de mercurio, la sección capilar no se vacía y el exceso de líquido cae al fondo de la rama menor. De esta manera se puede trasladar el sifón sin peligro de ruptura, dentro de un estuche análogo al de Fortin. Para que la envoltura protectora fuese menos ancha, Gay-Lussac encorvó la rama capilar, de manera que la rama menor quedara en la prolongación de la mayor.

Perfeccionamiento de Bunten. — De manera que para servirse del barómetro hay que ponerlo derecho y suspenderlo. Con el fin de evitar toda entrada de aire, el constructor Bunten tuvo la idea de soldar (fig. 158) el tubo capilar directamente con un tubo B de grueso diámetro, donde la rama mayor va á terminar, en punta afilada. Gracias á esta disposición, si pasan burbujas de aire por el tubo capilar durante la inversión, van á alojarse en la parte más elevada del ensanche, en vez de subir hasta la cámara barométrica.

151. **Barómetro normal.** — Para las observaciones de precisión en los laboratorios se usa un barómetro de cubeta descrito por Regnault con el nombre de *barómetro normal*[1].

La cubeta es una artesa prismática rectangular (fig. 159), sólidamente fija á una gruesa tabla adherida á la pared. En el mercurio que esa artesa contiene penetra un tubo de 2,5 á 3 centímetros de diámetro, bastante ancho por tanto para suprimir la depresión capilar, y de 1 metro de altura. Se le sujeta á la tabla con abrazaderas á fin de que se mantenga vertical.

Fig. 159.

No obstante que la sección de la cubeta es bastante grande respecto de la del tubo para que las variaciones de nivel sean muy pequeñas, se suprime absolutamente el inconveniente que de ahí podría resultar utilizando una disposición especial. Á una de las paredes laterales de la cubeta se adapta una pieza que sostiene una tuerca *e*, por la cual pasa un tornillo de dos puntas, cuya longitud se ha medido con el catetómetro. Antes de cada medida se hace que la punta inferior vaya á coincidir con el nivel del mercurio en la cubeta, como en el barómetro de Fortin. Ya sólo falta calcular con el catetómetro la distancia vertical de la punta *a* del tornillo al nivel *b* del mercurio en el tubo

1. También se le llama á veces *barómetro de Regnault.*

y añadir después á esta distancia la longitud del tornillo : así se obtiene la altura barométrica con mucha exactitud.

Perfeccionamiento de A. Leduc. — Leduc ha añadido al barómetro de Regnault un perfeccionamiento que aumenta la precisión de las medidas á la vez que las simplifica.

Coloca á caballo sobre el borde de la cubeta un tubo de forma de S (fig. 186) cuya parte ancha tiene exactamente el mismo diámetro que el tubo barométrico con el cual constituye, por mediación de la cubeta, un sistema de vasos comunicantes, llenos del mismo líquido. La presión barométrica se mide por la diferencia de los niveles en ambos tubos, exactamente como en el barómetro de sifón. Bastan dos lecturas en el catetómetro.

No hay para que ocuparse de la corrección capilar. En efecto, dada la anchura de los tubos, subiría á 0,03 mm próximamente por parte y parte ; de modo que si existe diferencia se la puede desdeñar por completo, pues no hay que olvidar que la presión atmosférica varía en ocasiones varias centésimas de milímetro durante un experimento. Sería por tanto ilusorio buscar en las medidas una precisión superior al centésimo de milímetro.

El error de temperatura se corrige según es costumbre.

2. **Barómetros de la oficina internacional de pesas y medidas.** — En la Oficina

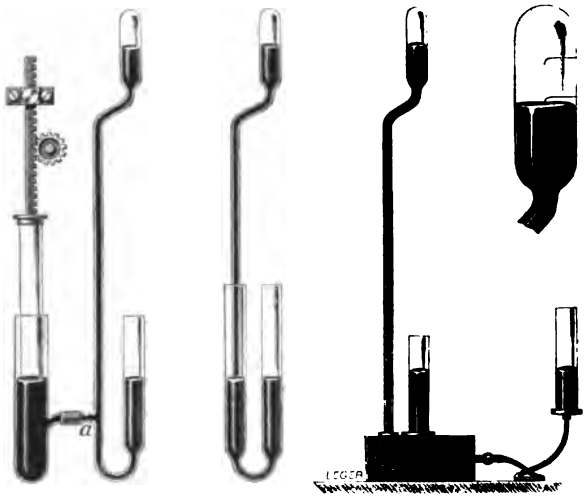


Fig. 160.

internacional instalada en Sevres, cerca de París, usan barómetros de sifón cuyos tubos extremos se encuentran en la misma línea vertical (fig. 160). Las alturas se toman por medio del comparador. Los meniscos se encuentran en tubos de unos 25 milímetros de diámetro y por *vía ascendente*, á fin de evitar los meniscos huecos que se producen á menudo cuando el barómetro baja.

Este propósito se logra sea introduciendo un émbolo de vidrio en un depósito lateral colocado á la altura de la rama abierta (*barómetro de émbolo penetrante* de Amagat), sea bajando el tubo barométrico hasta una de las ramas de una cubeta fija en forma de U (*barómetro de tubo móvil*), sea por fin colocando á cierta altura una probeta, que contiene mercurio, y que está en comunicación con la rama menor del barómetro (*barómetro de reserva auxiliar*). Los órganos móviles están sostenidos por carretillas.

Tómase como extremidad de la altura barométrica el punto medio de la distancia que separa una punta fina de vidrio negro, encorvada hacia el menisco en la parte central, de la imagen de la punta reflejada por esta región del menisco que es plana (Pariett). La punta se puede reemplazar por la imagen real de un hilo (Marek) ó dirigir la visual directamente sobre una marca y su imagen de una regla colocada detrás del barómetro (Thiesen).

Tres ó cuatro termómetros cuyos depósitos penetran en el mercurio, permiten efectuar las correcciones de temperatura; por otra parte, la curva de los meniscos es bastante grande para que sea posible apreciar el error debido á la fuerza elástica del aire en la cámara barométrica, si ha lugar á ello.

153. **Correcciones barométricas.** — La altura barométrica, medida con instrumentos y según métodos de precisión, debe ser reducida además á ciertas condiciones normales, adoptadas por todos los científicos. Así es que el número bruto indicado por la experiencia es sometido á cierto número de correcciones, que vamos á exponer con sujeción á las reglas observadas en la Oficina internacional de pesas y medidas [1].

Hay *correcciones principales*, que precisa aplicar en cada lectura y que constituyen á menudo toda la reducción. Refiérense á la temperatura y á la aceleración de la gravedad. Además, hay *correcciones secundarias*, siempre muy escasas y á veces nulas, que tocan á la capilaridad, á la presión del aire en la cámara barométrica, á la tensión de los vapores mercuriales, á la presión del mercurio sobre sí mismo y á las fuerzas eléctricas.

I. *Correcciones principales.* — 1°. *Temperatura.* — El error debido á la temperatura es doble; uno procede de la dilatación de las reglas metálicas y es *error por defecto;* el otro de la dilatación del mercurio y es *error por exceso.*

Sea h la altura observada, h_0 la altura corregida, t la temperatura de la experiencia, αr y βr los coeficientes de dilatación que sirven para la regla entre 0° y t°, αm y βm los coeficientes para el mercurio. Según las ecuaciones que veremos más adelante, se tienen las igualdades siguientes entre las longitudes l_0 y l_t de la regla y los volúmenes V_0 y V_t del mercurio :

$$l_t = l_0\ (1 + \alpha r\, t + \beta r\, t^2),$$
$$V_t = V_0\,(1 + \alpha m t + \beta m t^2).$$

De ahí se deduce

$$h_0 = h\ [1 - (\alpha m - \alpha r)\, t + (\alpha^2 m - \beta m + \beta r)\, t^2].$$

Los mejores datos que tenemos sobre la dilatación del mercurio resultan de los experimentos de Regnault. Cuanto á la dilatación de la regla, es preciso determinarla en cuanto es posible, sea directamente valiéndose de comparadores, sea con un trozo ó muestra del mismo metal.

2°. *Gravedad.* — Se ha convenido en reducir todas las observaciones en que g interviene á lo que serían si este coeficiente conservara como valor constante, el que tiene á la latitud de 45° y al nivel del mar.

Completando una fórmula de Laplace y teniendo en cuenta gran número de observaciones, Broch ha propuesto la fórmula de corrección

$$\frac{G_{\varphi,m}}{G_{45\cdot 0}} = (1 - 0{,}00259 \cos 2\varphi)\ (1 - 0{,}000000196\ M).$$

siendo G_{φ}, m el valor de la aceleración en la latitud φ° y á la altura de M metros y $G_{45\cdot 0}$ el número corregido. Esta corrección es en París, para la presión normal, de unos + 0,25 mm.

II. *Correcciones secundarias.* — 1°. *Capilaridad.* — Hemos visto cómo se elimina el efecto de las fuerzas capilares en los barómetros de precisión. En los otros (Fortin, Gay-Lussac, etc.), los errores capilares son bastante sensibles y conviene corregirlos.

Demuéstrase (263) que esta depresión capilar depende al mismo tiempo del

1. Véase el *Traité pratique de la thermométrie de précision*, por Ch.-Ed. Guillaume agregado á la oficina internacional de pesas y medidas.

diámetro del tubo y de la *flecha* del menisco. Llámase así la altura *od* (fig. 161) de la superficie convexa del mercurio sobre la sección horizontal *ab* que sirve de base al menisco.

Medida de la flecha. — La longitud de la flecha no es constante en un mismo tubo, sino que varía según que el menisco se forme por un movimiento ascendente ó uno descendente. Se la mide haciendo que el borde superior de la corredera coincida sucesivamente con la base del menisco y después con su vértice. Leyendo en la escala el camino que ha recorrido la corredera, se tiene la altura de la flecha.

Fig. 161.

Medida del diámetro. — El diámetro interior de los tubos se determina pesándolos sucesivamente vacíos y llenos de mercurio. La diferencia de pesos indica el peso del cilindro de mercurio contenido en los tubos. Como la altura *h* de este cilindro es fácil de medir, el volumen y por consiguiente la sección se deducen de la fórmula $P = ShD$. Por lo demás, este método no puede aplicarse sino á tubos *bien calibrados*, esto es, perfectamente cilíndricos. Ordinariamente el constructor vende con el aparato un pedazo del tubo que ha servido para hacerlo. Á ese trozo se aplica el procedimiento indicado.

Tablas de corrección. — Por medio de estos dos datos se encuentra el valor de la depresión en las tablas de doble entrada, calculadas con arreglo á fórmulas de Laplace.

Observación. — Existen además en estos barómetros otras causas de error debidas á que no se cumplen de manera completamente exactas las condiciones relativas á los instrumentos de precisión. Por esto es preferible, cuando se puede, determinar la corrección total del barómetro comparándolo con un barómetro normal *de menisco ascendente.*

2°. *Presión del aire en la cámara barométrica.* — Los restos de aire que puede haber sobre el mercurio ejercen en éste una presión inversamente proporcional al volumen de la cámara. Por tanto, si se determina la corrección para una posición cualquiera del nivel, se podrá calcularla para las demás posiciones. Á este efecto, dada cierta capacidad de la cámara, que se conoce por medio de un aforo precedente, se compara el barómetro en cuestión con otro instrumento análogo, de precisión idéntica, cuyo menisco superior ha sido llevado siempre al mismo nivel.

Por lo demás, en un barómetro que se ha llenado en el vacío y se ha hervido, la presión del aire es tan escasa, que sólo se la pone en evidencia mediante una serie de observaciones precisas.

3°. *Tensión de los vapores mercuriales.* — Los vapores de mercurio que se forman en la cámara de vacío pueden deprimir también el menisco superior, tanto más cuanto más elevada es la temperatura. Pero de las experiencias de varios físicos[1] resulta que esta depresión es siempre tan pequeña en todas las temperaturas á que puede estar expuesto un barómetro, que toda corrección por tal motivo sería ilusoria.

4°. *Compresibilidad del mercurio.* — La altura barométrica normal puede ser referida á una columna de mercurio que estuviera libre de la compresión que ejerce sobre sí misma por su propio peso. Calcúlase que la contracción de una columna de 760 milímetros, bajo su propio peso, puede llegar á 0,0027 mm. Esta corrección aumenta con el cuadrado de la altura y puede ocurrir que en ciertas medidas con el manómetro, no sea ilusorio tenerlas en cuenta.

5°. *Fuerzas eléctricas.* — El mercurio de un barómetro se carga de cierto potencial negativo cuyo valor depende de sus movimientos en el tubo y del estado eléctrico é higrométrico del aire. De modo que los cuerpos inmediatos pueden ejercer sobre el mercurio fuerzas atractivas ó repulsivas, según su estado. El efecto de estas fuerzas es poco conocido y sin duda muy escaso. El único fenómeno eléctrico que hasta hoy parece bien demostrado es el siguiente : cuando se acerca una punta á un menisco para determinar su posición, el mercurio se levanta, toca la punta y vuelve á bajar. La amplitud de este movimiento puede ser de varios micrones.

1. Entre otros Regnault, Hagen, Hertz, etc.

154. **Construcción de los barómetros.** — 1°. *Elección del líquido barométrico.* — Debe preferirse el mercurio á cualquier otro líquido por varias razones : su gran densidad, su pequeña volatilidad, y su casi nulo poder disolvente de los gases ; pues así tiene el aparato escasas dimensiones y son poco temibles los vapores ó gases disueltos que pueden difundirse en la *cámara barométrica* y que deprimirían más ó menos el mercurio.

El mercurio está de ordinario muy puro cuando sale de la mina. Se puede utilizarlo inmediatamente en este estado después de agitarlo con cenizas calientes y filtrarlo á través de una capa porosa. Pero cuando este líquido ha pasado más ó menos tiempo en las casas de comercio ó en los laboratorios, hay que someterlo á purificación previa. Úsanse varios procedimientos.

He aquí el de los constructores : se agita el azogue con una solución de nitrato de mercurio y se le introduce, gota á gota, por un embudo afilado, en un frasco que contenga ácido nítrico diluído. Después se le vierte en ácido sulfúrico concentrado y por fin se le mantiene durante algún tiempo en un frasco lleno de potasa cáustica en pedazos, de donde se le extrae, á medida que se le necesita, por una llave colocada en la parte inferior.

Conviene decir que la densidad del mercurio purificado por diversos métodos varía entre límites muy cercanos [1].

Mercurio tratado por el ácido nítrico, el agua amoniacal, el agua pura, y destilado en el vacío.	13,59663
Tratado del mismo modo pero seco en el vacío.	13,59563
Calentado con una solución de bisulfato de potasa, y filtrado después en el vacío.	13,59660
Mercurio del comercio filtrado cuatro veces.	13,59557
Regnault había obtenido anteriormente.	13,59560

Ahora bien, una diferencia de una unidad en la cuarta cifra decimal corresponde á una variación de altura barométrica de 0,006 mm. Luego, las mayores diferencias observadas por Wild y Marek introducirían en los cálculos errores que apenas pasan de 0,01 mm.

2°. *Manera de llenar el barómetro. — Caso del barómetro de cubeta ordinario.* — Se cierra el tubo por un extremo, y después se suelda provisionalmente en el otro una ampolla de vidrio, que se retirará así que termine la operación. Entonces se le llena de mercurio puro hasta la garganta de la ampolla y se le coloca sobre un calentador de latón inclidado (fig. 162), rodeándolo de carbones incandescentes, para llevarlo á una temperatura cercana á la de ebullición del mercurio. Entonces se añaden nuevos carbones en la parte baja del calentador para obtener la ebullición, y una vez que ésta se prolonga 4 á 5 minutos, se transportan los carbones algo más arriba y sucesivamente á toda la longitud del tubo.

La ampolla de la extremidad superior sirve para recoger el mercurio que podría saltar por efecto de las sacudidas que produce la ebullición. Una vez frío el mercurio, se la corta pasando una lima por su garganta ; se acaba de llenar completamente el tubo con mercurio puro y caliente, y después se cierra herméticamente oprimiendo con el dedo la superficie convexa que sale del tubo, como en el experimento de Torricelli (fig. 150) ; inviértesele en la cubeta y está hecho el barómetro.

1. W. J. Marek, *Travaux et Mémoires*, t. II, 1883.

Observaciones. — 1°. Una vez terminada la operación precedente, el mercurio presenta distinto aspecto : las burbujas de aire y de humedad que estaban adheridas al vidrio han desaparecido y el

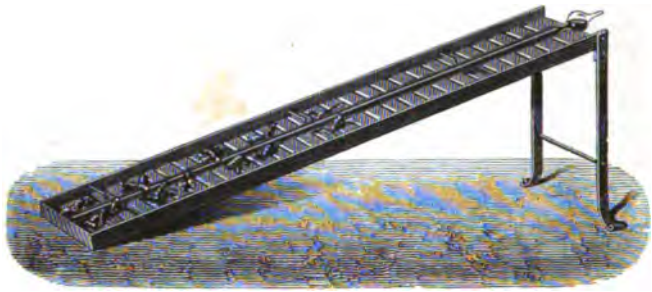


Fig. 162.

tubo presenta el brillo metálico de un espejo bien estañado. En esto se conoce si el barómetro está bien limpio de gas; por otra parte, cuando se inclina suavemente el tubo, óyese un sonido seco y metálico producido por el choque del mercurio contra el vértice : si quedaran aire ó humedad en la cámara barométrica, el sonido sería apagado.

Fig. 163.

2°. *Caso de los barómetros de sifón.* — El barómetro de Gay-Lussac se llena de la misma manera. Las dos ramas se reunen primeramente por el tubo capilar, de modo que formen un solo y mismo tubo, casi rectilíneo; una vez introducido y hervido el mercurio, se encorva el tubo en su parte capilar, calentándolo encima de carbones ó con la lámpara de esmaltar.

Caso de los barómetros de precisión [1]. — Un barómetro de tubo ancho debe llenarse necesariamente en el sitio donde ha de servir para evitar los accidentes del transporte.

Límpiase primero la parte interior del tubo con los líquidos siguientes : solución de potasa cáustica, agua destilada; ácido nítrico, agua destilada; amoniaco, agua destilada; por fin, alcohol y éter.

1. Procedimiento de la oficina internacional de pesas y medidas. Véase Ch.-Ed. Guillaume, *loc. cit.*

Después se suelda el tubo á un aparato especial de vidrio, que parte de la ampolla R (fig. 163), y que consiste en un tubo vertical A, ensanchado por la parte superior, y unido por medio de otro de enlace con una buena máquina neumática que pueda hacer el vacío con aproximación de un milímetro. El tubo A presenta un pequeño gollete lateral afilado, que penetra en la rama soldada del barómetro, la cual comunica con la bomba por el tubo de unión *d*.

Introdúcese el mercurio en la probeta C, y se hace el vacío en el aparato, al mismo tiempo que lo calentamos en todas sus partes, para expulsar la humedad; se procede así hasta que el mercurio alcance el tubo lateral en A y salga de este depósito formando gotecillas para dirigirse al barómetro.

La operación debe suspenderse de cuando en cuando para hacer hervir la última porción de mercurio introducido. Esto exige muchas precauciones.

155. **Previsión del tiempo por medio del barómetro.** — Uno de los usos principales que en la práctica tiene el barómetro es la previsión del tiempo por las variaciones de alturas de la columna. Vamos á examinar hasta qué punto es legítima y racional esta aplicación.

Se ha observado, *en los climas medios*, que el barómetro permanece generalmente cuando hace buen tiempo por encima de 0,758 m., mientras que no alcanza esta altura en los días de lluvia, nieve, viento y tempestad; y por fin, que cuando permanece en 0,758 m. hay por término medio tantos días de lluvia como de buen tiempo. Esta notable coincidencia justifica por tanto en cierto modo el empleo del barómetro para la previsión del tiempo. Con tal objeto se adapta al instrumento una pequeña graduación especial, que comprende los tiempos probables correspondientes á variaciones de presión de 9 milímetros, algo por encima y algo por debajo de 0,758 m.

Altura.	Estado de la atmósfera.
785 milímetros.	Muy seco.
776 —	Buen tiempo fijo.
767 —	Buen tiempo.
758 —	Variable.
749 —	Lluvia ó viento.
740 —	Gran lluvia.
731 —	Tempestad.

Regla empírica. — Cuando el barómetro sube ó baja de manera lenta y continua durante dos ó tres días, hacia el buen tiempo ó hacia la lluvia, *puede considerarse muy probable la llegada ó la persistencia de uno de esos estados atmosféricos.* Las variaciones bruscas en uno ú otro sentido anuncian lluvia ó viento, y aun tempestad.

156. **Barómetro de cuadrante.** — Uno de los instrumentos á que se adapta con mayor frecuencia esta graduación meteorológica es el antiguo *barómetro de cuadrante* imaginado por Hooke en 1665.

El órgano aparente es un cuadrante más ó menos trabajado, que presenta en su centro una graduación meteorológica : *buen tiempo*, *variable*, etc.; recórrela una larga aguja (fig. 164), que es puesta en movimiento por el mercurio mismo del aparato, mediante la combinación que se observa á la derecha de la figura. En el eje de la aguja hay una polea O, por donde pasa un hilo que lleva en uno de sus extremos un peso P y en el otro un flotador, algo más pesado que P y sostenido por el mercurio de la pequeña rama del sifón. Cuando aumenta la presión atmosférica, el nivel disminuye en la rama menor, el flotador baja arras-

trando consigo la polea, y haciendo que la aguja ande de izquierda á derecha. Cuando la presión disminuye se produce el movimiento contrario, porque el mercurio sube en la rama menor y levanta al mismo tiempo el flotador. Resulta de ahí que la aguja se para en las indicaciones *variable*, *lluvia*, *buen tiempo*, *buen tiempo fijo*, etc., marcadas en el cuadrante, cuando el barómetro toma las alturas correspondientes, á condición sin embargo de que el instrumento esté bien arreglado. Esto sucede raras veces, pues si el instrumento es *sensible*, quiere decir, si un ligero movimiento del flotador da origen á una inclinación considerable de la aguja, entonces no tiene precisión ninguna, por causa de los rozamientos y de la rápida alteración del menisco mercurial.

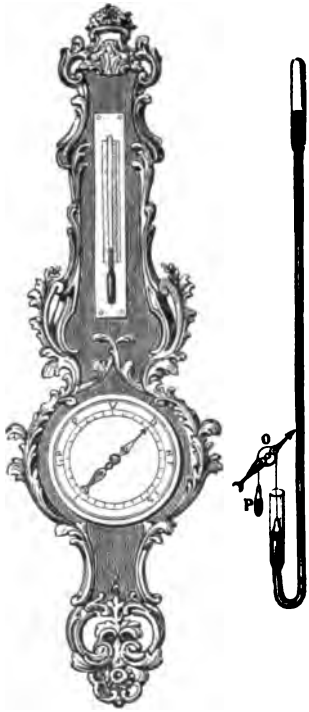


Fig. 164.

157. **Medida de las alturas con el barómetro ó nivelación barométrica.** — Otro uso muy frecuente del barómetro es la medida de las alturas. La teoría de este aparato hace prever, y la experiencia de Perier demostró, que *la presión atmosférica disminuye á medida que se sube en la atmósfera.* Como la disminución de presión se revela por el descenso de la columna barométrica, resulta de ahí que *existe relación entre la altura de un lugar y la altura barométrica que en el mismo se observa.* Concíbese pues que de la observación del barómetro se puede deducir la distancia vertical de dos lugares situados en la misma latitud, pero á diferentes alturas. Esta operación geodésica se llama en ocasiones *nivelación barométrica.*

1°. *Cálculo aproximado.* — Si la densidad del aire fuera la misma á todas las alturas, la operación se reduciría á un cálculo sencillísimo. En efecto, siendo la densidad del mercurio unas 10,466 veces mayor que la del aire, una columna barométrica de 1 milímetro haría contrapeso á una de aire de análoga sección y 10,466 veces más alta, es decir, igual á 10,466 m. Por consiguiente, si la diferencia de las alturas barométricas observadas en dos estaciones fuera de 1, 2, 3... milímetros, se deduciría de ahí que la diferencia de las alturas es 1 vez, 2 veces..., 3 veces...10,466 m. Pero *como la densidad del aire disminuye á medida que se sube en la atmósfera*, este cálculo no puede aplicarse sino á alturas muy pequeñas.

2°. *Enunciado de la fórmula de Laplace ó fórmula barométrica.* — Teniendo en cuenta esta variación de densidad llegó Laplace á descubrir una relación numé-

rica bastante compleja entre las alturas barométricas H' y H, observadas en dos estaciones, y su diferencia z. Esta relación, que se llama fórmula barométrica [1], es la siguiente :

$$z = 18\,405^{m}\,(1 \times 0{,}002552 \cos 2\lambda)\left[1 + 2\,\frac{t + t'}{1000}\right] \log \frac{H}{H'};$$

H' y H son las alturas barométricas *corregidas y reducidas*, en la estación más elevada y en la más baja, t' y t las temperaturas, λ la latitud del lugar.

Esta fórmula supone algunas condiciones más, que sólo imperfectamente se obtienen : 1°. que la intensidad de la gravedad no varíe sensiblemente entre las dos estaciones ; 2°. que la temperatura sea constante é igual á la media de las temperaturas extremas ; 3°. que la capa de aire interpuesta esté perfectamente en calma y desprovista de vapor de agua ; 4°. que el coeficiente de dilatación del aire sea igual á 0,004, en vez de 0.00366.

Para la latitud de 45°, $\cos 2\lambda = 0$, y la fórmula pasa á ser

$$z = 18\,405^{m}\left[1 + \frac{2\,(t + t')}{1000}\right] \log \frac{H}{H'}.$$

3°. *Enunciado de la fórmula de Babinet.* — Para las alturas inferiores á 1000 metros, Babinet ha dado la fórmula simplificada

$$z = 16\,000^{m}\left(\frac{H' - H}{H' + H}\right)\left[1 = \frac{2\,(t + t')}{1000}\right],$$

que dispensa del uso de los logaritmos.

4°. *Aplicación de las fórmulas.* — La aplicación más frecuente de estas fórmulas consiste en medir la altura de una montaña. Conviene elegir para ello un tiempo tranquilo, para obtener en cuanto es posible el estado de equilibrio supuesto por la fórmula. Si la altura que se mide no es muy grande, cabe operar solo ; pero en el caso de ser considerable y exigir tiempo de ascensión algo largo, durante el cual puede variar la presión atmosférica, entonces debe haber dos personas, provistas de barómetros comparables. Uno de los observadores se queda al pie de la montaña, mientras el otro se transporta á la cima ; después, á la hora convenida, toman nota simultánea de la altura del barómetro y del grado de calor. Con estas precauciones la medida resulta exacta, con diferencia de unos cuantos metros.

Observemos que estas fórmulas barométricas pueden servir para *reducir* las alturas barométricas al nivel del mar, cuando se conocen las diferentes alturas z de los puntos de observación.

5°. *Barómetros usados.* — Para la nivelación barométrica deben usarse preferentemente instrumentos que, á la vez de ser portátiles, presenten caracteres de precisión, como el de Gay-Lussac, y sobre todo el de Fortin. Sin embargo, los aparatos más usuales son los barómetros llamados *metálicos* ó *aneroides :* su inferioridad en lo que á precisión toca se compensa por lo cómodos que son : vamos á describir los principales tipos de ellos.

158. **Barómetros metálicos ó aneroides.** — 1°. *Principio.* — El principio en que estos aparatos se fundan fué enunciado por Vidi. Indican las variaciones de la presión atmosférica mediante las deformaciones más ó menos grandes que ésta hace experimentar á una caja metálica, de paredes muy elásticas, vacía de aire y perfecta-

1. Véase en el *Anuario de la Oficina de Longitudes* la fórmula barométrica completa, con los coeficientes numéricos, y tal como se la usa en la práctica.

mente cerrada. Se les gradúa por comparación con un barómetro de mercurio; pero esta graduación, siempre poco precisa, aun en los principios, no tarda en ser totalmente incorrecta, por efecto de una variación lenta en la elasticidad del muelle metálico y de una deformación correspondiente de este último.

2°. *Barómetro de Vidi.* — La aplicación más afortunada de este principio es la que llevó á cabo Vidi personalmente en el barómetro que lleva su nombre. Compónese este aparato de un tronco de cilindro metálico cuya base inferior es

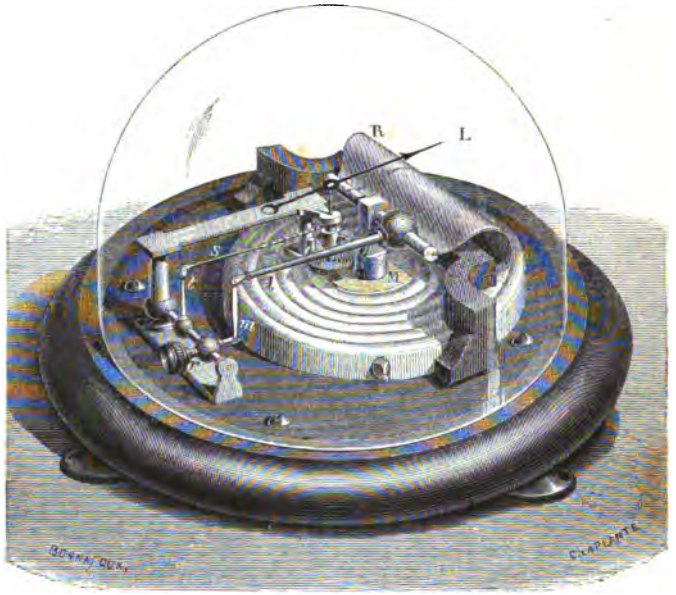


Fig. 165.

plana, estando la superior acanalada circularmente (fig. 165). Hácese en ella el vacío interiormente y como la presión atmosférica se ejerce sin contrapeso sobre la cara superior, tiende á hacer más ó menos llana esta especie de caja. Los repliegues metálicos *no aumentan la presión proporcionalmente á su superficie*, pues la resultante de las presiones que la atmósfera ejerce sobre ellos no depende sino de la superficie de su proyección horizontal; pero sí aumentan mucho la flexión correspondiente á una misma presión. Esta flexión produce el movimiento vertical de un tope metálico, M, grueso y pepueño, fijo en el centro de la base acanalada, movimiento que se transmite á la aguja L, que gira en torno de un círculo graduado, por medio de un poderoso muelle R, de vástagos articulados *l* y *m*, del eje *r*, del vástago articulado *l* y de la cadena *s*, la cual va á arrollarse sobre la polea que sostiene la aguja, manteniéndose tensa gracias á un pequeño muelle antagónico.

3°. *Barómetro de Bourdon.* — Está formado (fig. 166) por un tubo metálico aplanado (cuya sección se ve en S), donde se hace el vacío

y que se fija por su punto medio. Cuando aumenta la presión atmosférica, como no está equilibrada interiormente, el tubo se aplana más y su longitud disminuye : de ahí resulta que la curvatura se acentúa y que las dos extremidades se acercan una á otra. Si la presión atmosférica disminuye se opera el movimiento contrario. Estos movimientos se transmiten á la aguja por medio de dos vástagos articulados á una palanca móvil en torno de su punto fijo. Los dos brazos de la palanca se enlazan con los vástagos, y su centro está en relación con un sector dentado, á que transmite los movimientos del tubo metálico; el sector engrana con un piñón que sirve de sostén á la aguja y la hace moverse sobre una muestra graduada donde se marcan las indicaciones *variable*, *buen tiempo*, *buen tiempo fijo*, etc.

Fig. 166.

4°. *Ventajas é inconvenientes de los barómetros metálicos.* — Estos barómetros son muy cómodos, fáciles de transportar, muy sensibles, pero poco precisos. La elasticidad del metal se modifica por el funcionamiento mismo del aparato, de modo que éste, bien arreglado al principio, no tarda en andar mal. Este defecto es particularmente común en los barómetros de bolsillo que sirven en las expediciones y en las ascensiones aerostáticas, pues pasan por cambios de presión bruscos y considerables. Para apreciar la precisión de un instrumento de este género, hay que ensayarlo en comparación con uno de mercurio en un recipiente donde se hace variar poco á poco la presión dentro de los límites á que se destina. Este ensayo debe repetirse de tiempo en tiempo, á título de comprobación [1].

1. En la Meteorología hablaremos de los *barómetros registradores*, que se usan para *apuntar*, para tomar nota constante de las variaciones de la presión atmosférica en un lugar dado.

CAPÍTULO II

ESTÁTICA DE LOS GASES.

—

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES Y AEROSTATOS.

159. **Extensión del principio de Arquímedes á los gases.** — Como todos los gases en general y la atmósfera en particular son pesados, ejercen lo mismo que los líquidos en equilibrio, presiones normales sobre los cuerpos sólidos en ellos sumergidos. Estas presiones tienen una resultante determinada, á la manera que en el caso de los líquidos, por el principio de Arquímedes, que es posible generalizar así:

Cuando un cuerpo sólido está sumergido enteramente dentro de *un fluido grave en equilibrio*, las presiones que se ejercen en su superficie tienen una resultante única, igual y directamente opuesta *al peso del volumen fluido desalojado* y aplicada en el centro de gravedad de este volumen.

Este principio se puede demostrar *a priori* para los gases, como ya hemos hecho (138) tratando de los líquidos. También es posible demostrarlo experimentalmente por medio del pequeño aparato llamado *baróscopo*.

160. **Experiencia del baróscopo.** — 1°. *Descripción.* — Este aparato consiste en una especie de balanza pequeña cuyo fiel sostiene, en vez de platillos, por una parte una pequeña masa de plomo *b* y por la otra una esfera de cobre hueca *a*, de medio decímetro cúbico de volumen próximamente (fig. 167). La distancia de la masa *b* á la aguja del fiel se hace variar para obtener el equilibrio de los dos cuerpos, ya en el aire, ya en el vacío.

2°. *Usos.* Este aparato fué inventado por Otón de Guericke para medir, ó por lo menos indicar, las variaciones de la presión atmosférica [1]; pero ya no se le usa más que para poner de manifiesto la existencia del empuje de los gases y para demostrar el principio de Arquímedes, en la forma siguiente:

Todo cuerpo sumergido en un gas parece perder en él una parte de su peso igual al peso del gas que desaloja.

Empiézase por obtener en el aire la horizontalidad del fiel, y después se coloca el aparato debajo de la campana de la máquina neumática, haciendo el vacío: entonces se ve que el fiel se inclina en el sentido de la esfera grande (fig. 167). Esto prueba evidentemente que el peso real de la esfera es mayor que el de la pequeña masa de plomo, puesto que ahora ninguna de las dos soporta un empuje

De ahí procede su nombre: (de βάρος, peso, y σκοπεῖν, examinar.)

sensible y que ambas obedecen libremente á la gravedad. Así pues, si se equilibraban en el aire es porque el exceso de peso de la esfera grande estaba compensado por el exceso de empuje que sufría de parte del gas : lo cual prueba la existencia de dicho empuje.

Podría efectuarse la experiencia inversa, es decir, equilibrar primero la esfera en el vacío por medio del contrapeso, y dejar entrar después el aire debajo de la campana : esta vez el fiel se inclinaría hacia el lado de la masa de plomo.

Fig. 167.

3ª. *Teoría del baróscopo.* — Admitiendo de antemano el principio de Arquímedes, se pueden prever estos dos movimientos en sentidos contrarios y calcular las diferencias de empuje de que resultan en ambos casos.

Sean P el peso real de la bola y V su volumen; p el peso real del contrapeso y v su volumen. Imaginemos que se obtenga el equilibrio del baróscopo en una atmósfera donde la presión sea H y el peso específico del aire a ; puede escogerse el contrapeso p de modo que los brazos de palanca del fiel sean iguales cuando hay equilibrio. Entonces la ecuación de éste, fundada en el principio de Arquímedes, es

$$[1] \qquad P - Va = p - va, \qquad \text{ó bien} \qquad (P - p) - (V - v)\, a = 0.$$

Si la presión atmosférica pasa á ser H', sea que se deje el instrumento en la atmósfera libre, sea que se le ponga debajo de la campana de una máquina neumática, el peso del litro de aire se convertirá en a' : entonces la ecuación de equilibrio dejerá de estar satisfecha, puesto que permaneciendo constante el término positivo, el negativo varía al mismo tiempo que a. Se tendrá

$$P - p - (V - v)\, a' \gtrless 0.$$

El fie se inclinará en un sentido ó en otro, según que se tenga

$$P - p - (V - v)\, a' > 0 \qquad \text{y por tanto} \qquad a' < a$$

ó bien

$$(P - p) - (V - v)\, a' < 0 \qquad \text{y por tanto} \qquad a' > a$$

De consiguiente, la inclinación del fiel indicará directamente estas variaciones de densidad y, como consecuencia, las de la presión atmosférica.

161. **Consecuencia del principio de Arquímedes : Pesos reales y pesos aparentes. — Corrección de las pesadas hechas en el aire.** — Como los cuerpos pierden en el aire una parte de su peso igual al peso del gas que desalojan, hay que distinguir su *peso real*, es decir, su *peso en el vacío* y su *peso aparente*, quiere decir, su *peso en el aire*. La balanza no indica el peso real, sino sólo el aparente.

Del peso aparente de un cuerpo se puede deducir el real. Sea p su peso real

en kilogramos y d su peso específico, $\frac{p}{d}$ será el volumen del cuerpo en litros. Sea a el peso de un litro de aire en las condiciones de temperatura y de presión en que se ha efectuado la pesada; el del aire desalojado por el cuerpo es $a\frac{p}{d}$. Luego su peso aparente es

$$p - a\frac{p}{d} \quad \text{ó} \quad p\left(1 - \frac{a}{d}\right).$$

Análogamente, los pesos conocidos que sirven en la pesada han sido marcados en el vacío; de modo que sólo intervienen en el equilibrio del fiel por su peso aparente. Sean P la suma de estos pesos y D la densidad de su sustancia, hállase análogamente que su peso aparente es $P\left(1 - \frac{a}{D}\right)$. Si la balanza es exacta, estos dos pesos aparentes son iguales, y se puede escribir la ecuación de equilibrio

$$p\left(1 - \frac{a}{d}\right) = P\left(1 - \frac{a}{D}\right),$$

de donde se deducirá el valor de p.

162. **Consecuencias del principio de Arquímedes: Equilibrio de los cuerpos sumergidos en la atmósfera.** — Á los cuerpos sumergidos en el aire ó en cualquier otro gas se les aplica cuanto se ha dicho de los cuerpos sumergidos en los líquidos (118). Sean V el volumen de un cuerpo, D su peso específico á la temperatura de la atmósfera ambiente y a el peso específico actual del aire atmosférico: el cuerpo está sometido á dos fuerzas verticales y opuestas, su peso VD y el empuje del aire Va, cuya resultante es una fuerza vertical, de intensidad igual á V $(D - a)$ y dirigida en el sentido de la mayor. Hay que considerar tres casos:

1°. $D > a$; es decir que *el cuerpo sea más denso que el aire*, lo que ocurre con mayor frecuencia: entonces cae al suelo, arrastrado, no por su peso real VD, sino por su peso aparente V $(D - a)$.

2°. $D = a$; esto es, *el cuerpo tiene la misma densidad que el aire;* su peso y el empuje de abajo arriba se equilibran y el cuerpo flota en la atmósfera.

3°. $D < a$; quiere decir, *el cuerpo es menos denso que el aire:* el empuje es superior y el cuerpo sube hasta encontrar capas de aire de densidad análoga á la suya. La fuerza de ascensión es entonces igual á V $(D - a)$.

Estos dos últimos casos se aplican á los cuerpos que flotan en la atmósfera; entre ellos podemos citar el humo, los vapores, las nubes y sobre todo los aerostatos

163. **Aerostatos: montgolfieras y globos.** — 1°. *Definiciones.* — Los *aerostatos* [1] son unos globos de tela ligera é impermeable, que una vez llenos de aire caliente, de hidrógeno ó de cualquier otro gas más ligero que el fluido atmosférico, suben en el espacio ó se mantienen allí en equilibrio, conforme á las condiciones de equilibrio de los cuerpos que flotan en los gases.

1. Esta voz se deriva de ἀήρ, aire, y στάω, estoy en pie, en latín *stare*

Los primeros aerostatos se llenaron con aire caliente : llámaseles *montgolfieras* principalmente, en recuerdo de los hermanos Montgolfier, sus inventores. Hoy se utiliza con aquel fin el hidrógeno ó el gas del alumbrado y se les llama de ordinario *globos* [1].

Aeronautas [2] son los hombres que suben en los globos y ejecutan las maniobras exigidas por esta especie de navegación aérea.

Fig. 168.

Los perfeccionamientos más importantes del invento de los Montgolfier fueron introducidos desde el principio por el físico Charles.

2°. *Forma de los aerostatos.* — La primera forma que se dió á estos aparatos fué la de un globo casi esférico, terminado en su parte inferior por un apéndice cilíndrico ó cónico. En la mongolfiera este apéndice presentaba un ancho boquete por donde se introducía el aire caliente; en el globo (fig. 168), el apéndice termina en una punta provista de un estrecho orificio, por donde el gas hidrógeno puede salir en caso de dilatación exagerada, evitándose así una ruptura por exceso de presión. Además, todos los globos tienen en su parte superior otra abertura, cerrada por medio de una válvula de muelle. El aeronauta puede abrir á voluntad esta válvula, gracias á una cuerda que de ella cuelga (fig. 168). Esta forma esférica sigue siendo todavía la más usada. Sin embargo, en estos últimos tiempos se han hecho globos dirigibles, de forma elipsoidal. Así se reduce á un minimum la resistencia del aire; pero también se disminuye la solidez de la envoltura. Por tanto precisa utilizar para estos globos

1. En la categoría de los aerostatos se pueden incluir las máquinas volantes llamadas *aeronaves*. Pero éstas son aerostatos *más pesados que el aire*, una especie de *aves artificiales*, que toman del mecanismo fisiológico del vuelo los medios de sostenerse y progresar en el aire. La construcción de esos aparatos *más pesados que el aire*, cosa que constituye el problema de la *aviación*, está aún poco adelantada.

2. De ἀήρ, aire, y ναύτης, navegante.

prolongados telas más fuertes, más resistentes y en consecuencia más pesadas.

3°. *Estructura de la envoltura.* — La envoltura ó casco de los aerostatos debe hacerse con tela fuerte y á la vez impermeable á los gases, sobre todo cuando se va á llenarlos con hidrógeno. El físico Charles construyó algunos de estos aparatos con tafetán de seda barnizado de caucho. Giffard obtuvo impermeabilidad casi perfecta fabricando la envoltura con dos tejidos de lienzos separados por una hoja de caucho, y cubiertos por otra de muselina, barnizada á su vez con goma laca y pintada con varias capas de pintura al óleo.

4°. *Red y barquilla.* — Todos los aerostatos destinados á elevar personas en el aire están provistos de una red y una barquilla.

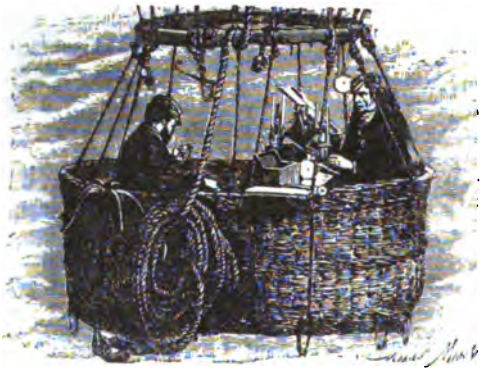


Fig. 169.

Aquélla protege la envoltura, cuyo hemisferio superior entero cubre; algo por debajo del círculo ecuatorial se desprenden las cuerdas de la red apartándose de la superficie del globo, para ir á terminar y amarrarse en un círculo de madera muy dura de donde se cuelga la barquilla (fig. 168). Ésta se compone de una especie de cesto de miembres, mayor ó menor según el fin á que se la destina (fig. 169).

5°. *Accesorios usuales.* Entre estos accesorios ó instrumentos, hay dos que son, por decirlo así, indispensables: el *lastre* y un *barómetro.*

El *lastre* se compone de cierto número de sacos de lona llenos de arena. Su destino no es en realidad el de *lastrar* el globo, quiere decir, el de aumentar su estabilidad, según hace el lastre de los navíos; sino que, vaciándolos según convenga, se puede regularizar la ascensión, moderar la velocidad del descenso ó hacerla nula en el momento oportuno. Cuanto al *barómetro*, es el compañero obligado de todas las ascensiones : la marcha de la columna barométrica es

lo único que puede indicar al aeronauta, á partir de cierta altura, si el aerostato sube ó baja.

Por fin, también se lleva generalmente un rollo de cuerda con nudos, de cincuenta metros próximamente, con una ó dos anclas (fig. 169).

6°. *Construcción de los aerostatos.* — La tela que ha de formar la envoltura se corta primero en grandes husillos, que constituyen como los meridianos de una esfera. Cóseseles unos con otros muy cuidadosamente, de modo que entre ellos no queden ni intersticios, ni hendiduras, ni siquiera los agujeros que hacen las agujas por donde podría escaparse el gas interior.

7°. *Manera de llenar las montgolfieras.* — En este caso la operación es muy sencilla. Basta colocar un hornillo debajo de la abertura del aparato y quemar allí materias combustibles. El aire caliente sube desde el fogón, penetra por la abertura, dilata sus paredes y acaba por llenar el aerostato dándole la forma esférica.

Pero no es posible conservar al aparato su temperatura inicial más que manteniéndola por medio de un hornillo permanente, que la montgolfiera debe llevar consigo, lo cual constituye peligro constante de incendio, sea cual fuere el mótodo de calefacción empleado.

8°. *Modo de llenar globos de hidrógeno.* — Este gas se ha preparado durante mucho tiempo por el método ordinario : la reacción del ácido sulfúrico dilatado sobre el zinc ó el hierro.

El comandante Renard ha indicado hace poco un método más expeditivo y mucho menos costoso : consiste en electrolizar una solución de potasa dilatada, á donde se lleva la corriente de una máquina dinamo-eléctrica por medio de electrodos de hierro[1].

Á medida que el globo va llenándose, lo sujetan algunos hombres tirando de cuerdas atadas á la red. Así que está suficientemente lleno, se retira el tubo de gas y el aeronauta, después de colocarse en la barquilla, da la voz de *¡suelten!* Todos sueltan las cuerdas y el aparato se eleva en los aires con tanta mayor velocidad cuanto más ligero es respecto del fluido desalojado.

9°. *Globos de gas del alumbrado.* — El hidrógeno es el mejor gas para estas operaciones, por su densidad inferior; pero como resulta caro, se prefiere el gas del alumbrado, cuya densidad es mucho mayor (0,63 próximamente), pero que se puede obtener con facilidad y sin mucho coste dondequiera que hay fábricas de él (fig. 170).

Observación. — El aerostato no se hincha por completo en ningún caso. Esta precaución presenta dos ventajas : la primera dejar el gas interior dilatarse libremente y sin peligro de ruptura para el casco á medida que la presión exterior disminuye por efecto de la ascensión en las capas superiores de la atmósfera; la segunda, conservar al aerostato una fuerza de ascensión casi constante.

1. Este método había sido indicado antes, sin que el capitán Renard tuviera noticia de él, por d'Arsonval.

164. **Teoria de los aerostatos. — Fuerza ascensional.** — Todo aerostato que se encuentra en el seno de la atmósfera está sometido á dos fuerzas :

1°. Su peso total P, fuerza vertical y dirigida de arriba abajo (gas, envoltura, barquilla, aeronautas, aparejos, instrumentos, etc.).

2°. El empuje P', fuerza vertical y dirigida de abajo arriba, que es igual al peso del volumen de aire desalojado por el aerostato *entero*.

Si el empuje P' es mayor que el peso P, el aerostato subirá en la atmósfera, bajo la influencia de una fuerza F, vertical y dirigida de

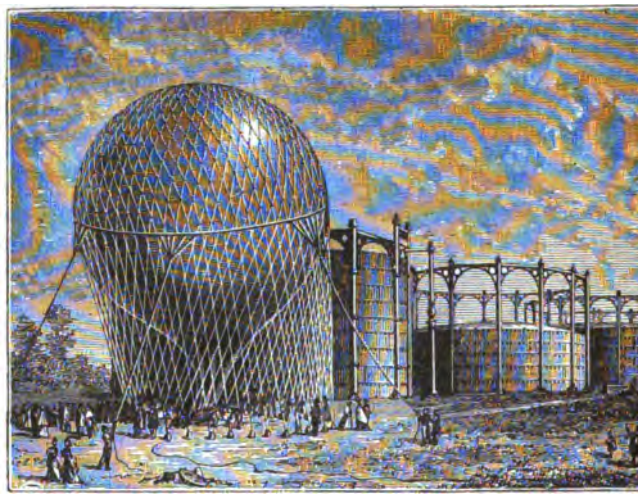


Fig. 170.

abajo arriba, igual á la diferencia P' — P. Esta fuerza aceleratriz F se llama la *fuerza ascensional* del aerostato.

Basta que la fuerza F sea de 4 á 5 kilogramos en el momento de partida para que el aerostato suba.

Observación. — La fuerza ascensional permanece *sensiblemente constante* todo el tiempo que el gas está sin hincharse completamente por la dilatación del gas interior, si se desprecia el peso de la envoltura y aparejos, que por lo demás son poca cosa respecto del peso total. En efecto, si la presión atmosférica se hace, pongamos por ejemplo, dos veces más pequeña á cierta altura, el gas del aerostato doblará de volumen, con arreglo á la ley de Mariotte, que más adelante estudiaremos. De ahí resulta que el volumen de aire desalojado se hará á su vez dos veces mayor; al mismo tiempo las densidades de los dos gases se harán dos veces menores : luego, ni el peso interior P ni el empuje P' cambiarán, ni por consiguiente la fuerza ascensional F, que es igual á P' — P.

Pero si el globo sigue subiendo una vez hinchado por completo, la fuerza ascensional decrece necesariamente; pues como el volumen de aire desalojado es el mismo, su densidad disminuye, y llega un momento en que el empuje es igual al peso del globo. Entonces se tiene el caso del equilibrio, ó $P = P'$; la fuerza F es nula, y el aerostato no puede subir; sólo le es dado seguir una dirección horizontal, arrastrado por las corrientes aéreas que dominan en la atmósfera.

Cálculo de la fuerza ascensional. — Sean V la capacidad del globo (que suponemos completamente hinchado), expresada en metros cúbicos; a el peso del metro cúbico del gas á 0° y bajo la presión de 76 cm.; a' el peso del metro cúbico de aire en las mismas condiciones; S la superficie de la envoltura exterior (no incluyendo la de la barquilla y aparejos), δ el peso medio de la unidad de superficie de la envoltura y Π el peso total del conjunto de los accesorios. Se tendrá evidentemente, despreciando el empuje del aire desalojado por los accesorios

$$P' = Va' \quad \text{y} \quad P = Va + \Pi,$$

de donde

$$F = V(a' - a) - \Pi.$$

Fuerza ascensional específica de los gases. — En esta fórmula el término positivo es con mucho el más importante. El factor $(a' - a)$, que es igual á la diferencia de los pesos del metro cúbico del aire y del gas, en las condiciones normales, se llama á veces *fuerza ascensional específica* del gas.

Así, para el *aire caliente* de las mongolfieras, la *fuerza ascensional específica* es

46	gramos á.	10°
338	—	50°
1015	—	200°

Para el *hidrógeno*, el coeficiente $(a' - a)$ es mucho más alto : es de 1203 gramos á 0°.

Para el *gas del alumbrado*, el valor medio es de 693 gramos.

Este coeficiente varía por necesidad con la temperatura y la presión, disminuyendo si la presión baja y cuando la temperatura sube.

Ejemplo numérico. — Puede citarse el globo cautivo que construyó Giffard en 1878 y que efectuó varias ascensiones diarias en el patio de las Tullerías durante la penúltima Exposición Universal.

La envoltura esférica tenía 36 metros de diámetro; por consiguiente, cuando estaba enteramente lleno de hidrógeno, su capacidad subía á 25000 metros cúbicos. El término positivo $V(a' - a)$ de la fuerza ascensional subía pues por lo menos á 25 000 kilogramos. El peso total sostenido por el aerostato llegaba á 18 850 kilogramos, en la forma siguiente :

Envoltura y válvulas	5 000	kilogramos.
Red y cuerdas.	4 500	—
Barquilla y accesorios.	1 600	—
Cable accesorio.	750	—
Cable de 600 metros que sujetaba el globo. . .	3 000	—
Peso medio de 50 viajeros.	4 000	—
	18 850	peso total.

Quedaba, pues, un excedente de fuerza que pasaba de 6000 kilogramos[1]. Agreguemos como dato curioso que el cable de 600 metros que sujetaba el colosal

1. Guillemin, *Monde physique*, t. I.

globo, era arrollado en un torno durante el descenso y que para ejecutar este trabajo se necesitaban nada menos que dos máquinas de vapor de 300 caballos.

165. **Paracaídas.** — Hay un accesorio de los globos que disfrutó extraordinaria boga en el momento de su invención, pero que actualmente está del todo abandonado: es el *paracaídas*, aparato destinado, según indica su nombre, á remediar los peligros de un descenso causado por una desgarradura del casco ó por cualquier otro accidente. Compónese de una ancha pieza de lona circular, formada por husillos cosidos entre sí á la manera que la envoltura de un globo y que puede plegarse ó abrirse como un paraguas grande (fig. 171). En el centro de la lona se practica una pequeña abertura circular, y del contorno cuelga un sistema de cuerdas que van á amarrar en la barquilla del aerostato, envolviéndola y sosteniéndola, si es necesario, como las cuerdas mismas del globo.

Fig. 171.

Durante la ascensión, el paracaídas permanece cerrado como un paraguas, y sujeto por un punto de su lona á la envoltura del globo. Cuando el aeronauta quiere utilizarlo, corta por una parte las cuerdas que unen el globo y la barquilla, y por otra desata el paracaídas de la envoltura. Este aparato cae primero con movimiento acelerado arrastrado por la barquilla; pero la resistencia del aire obliga al paraguas á abrirse cada vez más (fig. 171) y amortigua el descenso del sistema en proporción considerable. Así, en un descenso en paracaídas que el aeronauta Sivel ejecutó en Nápoles, tardó 43 *minutos para caer de una altura de* 1800 *metros;* pues bien, en un descenso libre habría tardado unos 19 *segundos*, bajando por consiguiente en este caso 135 *veces y media* más de prisa.

166. **Navegación aérea ó dirección de los globos.** — 1°. *Definiciones.* — Hemos dicho que con los medios de que el aeronauta dispone no puede ejercer acción más que sobre la fuerza ascensional del aerostato, de modo que se amortigüe ó se acelere su movimiento en el sentido vertical, pero que el avance ó retroceso en sentido horizontal no dependen de su voluntad, sino que se encuentran abandonados á los vientos de la región donde se halla. Ahora bien, el problema de la *navegación aérea* ó de la *dirección de los globos* consiste precisamente en la posibilidad de impulsar el aerostato en todos los sentidos horizontales, sea cual fuere la dirección del viento, según hace un barco que anda por la superficie del agua.

2°. *Historia.* — El problema se planteó desde el origen mismo del invento de los aerostatos y pareció por de pronto muy sencillo. Todas las soluciones propuestas se fundaban en la asimilación de la navegación aérea con la acuática, partiendo de la idea falsa de que si los vientos bastan para hacer andar los barcos, pueden prestar el mismo servicio á los globos. Pero las condiciones no son las mismas en ambos casos; si los navíos son dirigidos por el viento, débese esto á que tienen un punto de apoyo en el agua, fuera del viento, mientras que los aerostatos son juguete de éste, que es su único punto de apoyo.

« Sea fuerte ó escaso el viento, el aeronauta no puede percibirlo porque tanto

él como su aparato forman parte de la corriente. Así es que ve subir tranquilamente la llama de una bujía ó el humo de un cigarro, las cuerdas del globo colgar sin moverse, y los pliegues de la bandera en reposo. *Estando en globo no hay, no puede haber viento* [1]. » Es pues absurdo tratar de utilizarlo para dirigir el aerostato por medio de un órgano cualquiera.

3°. *Solución racional.* — La solución del problema de la navegación aérea se hallará en una imitación más racional de la terrestre.

Basta con observar que un aerostato que flota en una capa de aire donde su peso está equilibrado por el empuje, se encuentra en las mismas condiciones mecánicas que un buque sin velas que flota en la superficie del agua al abrigo del viento.

Si el aire está en reposo, el aerostato, que carece de fuerza motriz propia, permanecerá eternamente en la posición de equilibrio adoptada. No podrá abandonarla más que en el caso de tener velocidad propia, por la acción de un motor interno cualquiera. Si se fija en la barquilla, pongamos por ejemplo, una hélice de eje horizontal, y se la mueve con rapidez suficiente, esta hélice impulsará al aerostato, tomando su punto de apoyo en la masa de aire, según hace la de un barco en el agua. En cuanto á la dirección de ese bajel aéreo, se la obtendrá con ayuda de un timón, colocado en la popa, y que funcionará en el aire como el de los navíos en el agua, y por idéntico mecanismo.

En la navegación aérea se tienen los tres casos de la ordinaria :

1° $v > v'$: la velocidad propia v del aerostato es superior á la velocidad v' de la corriente aérea, quiere decir, del viento ;

$\left.\begin{array}{l} 2^\circ\ v = v' \\ 3^\circ\ v < v' \end{array}\right\}$: la velocidad propia es igual ó inferior á la del viento.

Un aerostato *construído y aparejado convenientemente* será perfectamente dirigible en el primer caso, y la maniobra se efectuará en el aire como en el agua ; en el segundo caso, el aerostato no podrá más que luchar contra el viento, sin moverse de sitio ; en el tercero (fig. 172), será arrastrado necesariamente por el viento, pero aun podrá barloventear, esto es, maniobrar de modo que siga una dirección « más ó menos inclinada respecto de la del viento.

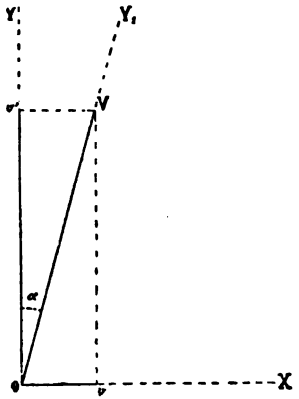


Fig. 172.

De manera que *teóricamente* todo aerostato será dirigible si satisface las condiciones siguientes :

1°. Estar provisto de un motor, ligero y potente á la vez, capaz de imprimirle velocidad notable sin disminuir demasiado su fuerza ascensional ;

2°. Estar aparejado como un barco de vapor, quiere decir, provisto de una hélice y de un timón, que sean apropiados al elemento gaseoso donde el aparato ha de moverse.

En la práctica este aparato no será dirigible sino en el seno de una atmósfera tranquila, ó contra un viento de velocidad inferior á su velocidad propia ; condiciones prácticas muy raras y muy difíciles de realizar.

4°. *Ensayos de realización de la solución racional. — Experiencia de Giffard.* — Los primeros ensayos serios de navegación aérea se deben al ingeniero Giffard, quien llevó á cabo dos experiencias, una en 1852 y la otra en 1855. En ambas utilizó globos de hidrógeno construídos según las reglas precedentes.

« La ascensión de este aerostato se efectuó con éxito y la máquina maniobró ; pero no pudo conservar su equilibrio al bajar. Cayó de punta y el globo se escapó de la red, yendo á perderse en el aire [2]. »

Experiencias de Dupuy de Lôme. — Este género de experiencias es muy cos-

1. J. Jamin, *les Ballons*.
2. Jamin, *les Ballons*.

toso. Así es que no las repitieron hasta veinte años después, á costa del gobierno de la Defensa Nacional, que confió en 1870 á Dupuy de Lôme la construcción de un globo dirigible. Se le llenó con gas del alumbrado y era de forma ovalada y oblonga como el de Giffard, pero mucho mayor (unos 3.500 metros cúbicos), lo que permitía transportar un motor más poderoso.

Dupuy de Lôme se embarcó en su aparato el 2 de febrero de 1872, desgraciadamente con muy mal tiempo. El aerostato marchó en una dirección inclinada respecto de la del viento. La desviación, calculada según la velocidad v y v', debía ser de 15°: se observó una de 10 á 12°. De modo que este experimento pudo considerarse como la demostración de los principios.

Experiencias de los capitanes Renard y Krebs. — Los capitanes Renard y Krebs realizaron en 1883 un gran progreso. Gracias al empleo de un motor eléctrico,

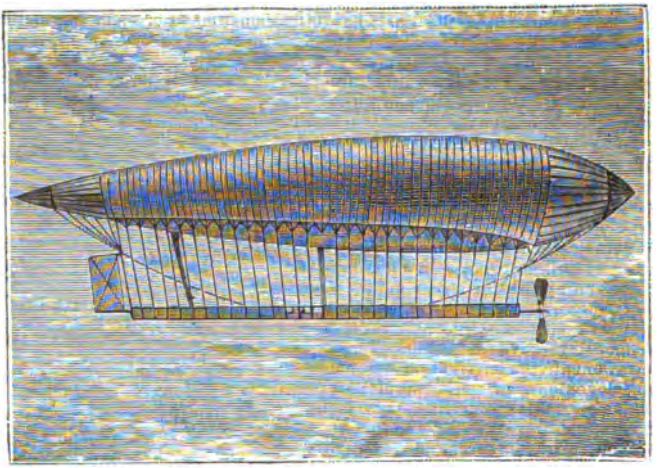


Fig. 173.

accionado por pilas ligeras, obtuvieron una velocidad propia de 5, 6 metros, que desde el primer día les bastó para vencer la resistencia del viento y asegurar el éxito entero de su experiencia [1].

Su aerostato era un globo de 1800 metros cúbicos, que podía transportar una carga total de 2000 kilogramos. Tenía forma prolongada, y llevaba una hélice y un globo auxiliar (fig. 173), según las reglas sentadas antes por Dupuy de Lôme. La barquilla tenía el aspecto de un bote de regatas, con un espacio en el centro para los aeronautas; la hélice estaba en la proa y el timón en la popa del navío aéreo. El aparato entero podía depositarse en un tinglado del establecimiento militar de Chalais, esperando un tiempo favorable, *condición sine qua non de buen éxito* para todas las experiencias de este género.

La ascensión se efectuó el 9 de Agosto de 1884, á las cuatro de una tarde tranquila. « Una vez libre el aerostato y con pequeñísima fuerza ascensional se elevó lentamente hasta la altura de las colinas inmediatas. Púsose en movimiento la máquina y bajo su impulso no tardó el aparato en acelerar su marcha obedeciendo fielmente la menor indicación de su timón [2]. » Así que estuvieron encima de la aldea de Villacoublay (fig. 174), á 4 kilómetros próximamente de Chalais, los aeronautas resolvieron dar la vuelta y tomar tierra, si era posible en el

1. Los hermanos Tissandier usaron con el mismo objeto desde algún tiempo antes (8 octubre 1883) un motor eléctrico; pero no obtuvieron sino 2,8 m. de velocidad.

2. *Actas de la Academia de ciencias*, comunicación de Renard y Krebs.

mismo punto de salida. Ejecutaron en consecuencia mediante maniobra conveniente media vuelta á la derecha y después algo más lejos un nuevo cambio de dirección á la izquierda, y pronto se cernieron á 300 metros sobre el lugar de partida, donde el descenso se efectuó sin ningún accidente. La fig. 174 representa de manera aproximada el recorrido de este viaje aéreo [1].

5°. *Conclusiones.* — La experiencia de Renard y Krebs es la primera que ha probado de manera positiva y completa la posibilidad de dirigir los aerostatos. Vése no obstante que falta todavía mucho por hacer, pues aun en París sólo reinan unos 108 días al año los vientos cuya velocidad es inferior á 7 metros y

Fig. 174.

que hacen posible el uso del aerostato dirigible; todo el resto del año los vientos son demasiado fuertes y el aparato no podría servir.

167. **Globos tripulados y globos no tripulados. — Sondas aéreas de Renard.** — Los últimos perfeccionamientos de la aerostación han tenido por objeto la sustitución de los globos *no tripulados* en vez de los *tripulados* ordinarios, para explorar las altas regiones de la atmósfera. Esta idea, emitida en 1873 por Claudio Jobert, ha sido examinada recientemente en su aspecto práctico por M. Hermite y el comandante Renard separadamente; este último ha dado á los aerostatos no tripulados el significativo nombre de *sondas aéreas*.

La sonda aérea Renard está formada por un globo de hidrógeno de 6 metros de diámetro y cuya envoltura, prácticamente impermeable, se reduce al peso minúsculo de 45 gramos por metro cuadrado. El globo lleva consigo los diversos

1. Este plano fué hecho por M. Tissandier, con arreglo á la nota científica de Renard y Krebs.

instrumentos de física destinados á las observaciones, barómetro, termómetro, actinómetro, electrómetro, etc., ingeniosamente transformados, de modo que no se eche de menos la falta de los aeronautas. Son unos registradores automáticos del sistema Richard, muy aligerados y protegidos contra los choques del descenso por unos dispositivos especiales llamados *parachoques*. El instrumento se encuentra suspendido, como una araña en medio de su tela, por un sistema de muelles de caucho, que van desde los vértices de la caja que lo contiene hasta los de una jaula de mimbre ó de un cesto ligero. El conjunto de la red, de los registradores y parachoques no pesa más de 5 kilogramos.

Preparada la sonda Renard de este modo y llena de hidrógeno, puede atravesar las $\frac{11}{12}$ partes de la masa atmosférica y llegar á la región donde la presión barométrica se reduce á 62 milímetros de mercurio, esto es á $\frac{1}{12}$ de atmósfera. Para llegar á idéntica altura, un globo ordinario — cuya envoltura pesa próximamente 300 gramos por metro cuadrado — debería tener 3700 metros cúbicos de capacidad si estuviera lleno de hidrógeno, y 12.000 usando gas del alumbrado.

Un día de buen tiempo se arregla la fuerza ascensional al salir de modo que el aparato suba con velocidad media de 3 metros por segundo, y en 2 horas próximamente se alcanza el límite de la ascensión. En la envoltura se practica una pequeña hendidura, á fin de que sin detener por esto en su camino al aparato, se abrevie el tiempo de su permanencia en las regiones elevadas y se obtenga el descenso regular con velocidad de 2 metros por segundo.

Estos aerostatos de nueva clase prestarán sin duda grandes servicios, permitiendo abordar directamente — sin mucho gasto y principalmente sin riesgos personales — el estudio tan poco adelantado aún de las altas regiones atmosféricas.

CAPÍTULO III

COMPRESIBILIDAD DE LOS GASES.

LEY DE MARIOTTE. — CASO GENERAL DE LA COMPRESIBILIDAD. MANÓMETROS.

168. **Ley de Mariotte.** — El físico francés Mariotte fué quien primero[1] enunció claramente una ley sobre la compresibilibad de los gases.

ENUNCIADO. — *Los volúmenes ocupados por una masa dada de gas, á temperatura constante, son inversamente proporcionales á las presiones que soporta.*

Demostración experimental. — 1°. *Caso de las presiones superiores á una atmósfera.* — *Tubo de Mariotte.* — Esta ley se probó con el aire por medio de un pequeño aparato que todavía hoy se llama *tubo de Mariotte*. Se le emplea en el caso de que la masa gaseosa se someta á presiones superiores á 1 atmósfera.

En una tabla de madera mantenida verticalmente se fija un tubo

1. *Essai sur la nature de l'air*, por el abate Mariotte (1676). Boyle, físico inglés, publicó algunos años antes (1662) sobre el mismo asunto experimentos (*Nova experimenta de vi aeris elastica*), que conducen á la misma conclusión.

de vidrio encorvado, de ramas muy desiguales (fig. 175 y 176). Á lo largo de la rama menor, que es cerrada, hay una escala que indica capacidades iguales, mientras que la otra, inmediata á la rama mayor, expresa las alturas en centímetros. Los ceros de ambas escalas se encuentran en una misma línea horizontal.

Viértese primeramente el mercurio por lo alto de la rama mayor,

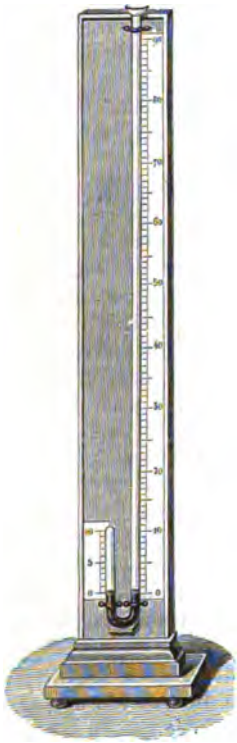


Fig. 175.

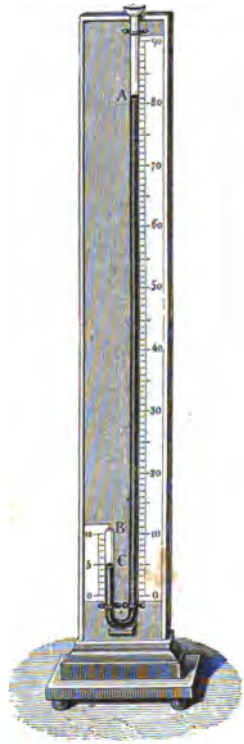


Fig. 176.

de modo que el nivel del líquido marque cero en ambas ramas, lo cual se obtiene después de algunos tanteos. El aire encerrado en la rama menor ejerce entonces sobre el mercurio allí contenido la misma presión que la atmósfera sobre el mercurio de la otra rama.

Después se echa mercurio en el tubo mayor hasta reducir á la mitad el volumen de la masa de aire, por ejemplo de 10 divisiones á 5 (fig. 176). Midiendo ahora la distancia CA de los niveles del mercurio en ambas ramas, se observa que es precisamente igual á la altura barométrica del momento. Luego la presión de la columna CA equivale á 1 atmósfera. Añadiendo la presión atmosférica que se

ejerce en A, sobre la columna, resulta que en el momento de reducirse á la mitad el volumen de aire, la presión es doble que primeramente, lo cual demuestra la ley.

Análogamente, si se echa mercurio hasta reducir la masa de aire á la tercera parte de su volumen inicial, se observa que la distancia vertical entre los dos niveles es igual á dos veces la altura barométrica. Esta columna de mercurio equivale, pues, á dos presiones atmosféricas que, agregándose á la que se ejerce directamente sobre el mercurio de la rama grande, forman un total de 3 atmósferas. De modo que el volumen de aire se ha hecho tres veces menor bajo una presión triple.

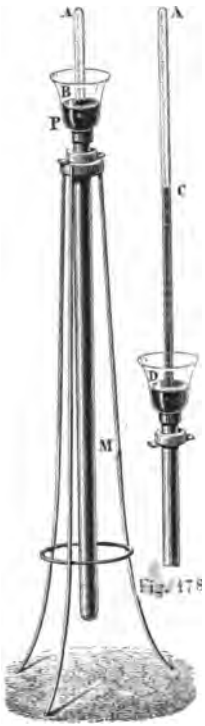


Fig. 178.

Fig. 177.

2°. *Caso de las presiones inferiores á una atmósfera.* — *Cubeta profunda.* — Se usa : 1°. Un tubo de Torricelli, tan bien calibrado como es posible y dividido en partes de igual longitud; 2°. una *cubeta profunda*, esto es, una cubeta de vidrio, tal como P, cuyo fondo está formado por un largo y ancho tubo de hierro M (fig. 177).

Llénase el tubo de mercurio próximamente en sus dos terceras partes y se deja lleno de aire lo demás; después se le vuelve é introduce en la cubeta profunda, que se ha llenado previamente de mercurio. Haciendo penetrar el tubo hasta que el mercurio se encuentre al mismo nivel dentro y fuera (fig. 177), se lee en el vidrio cuál es el volumen ocupado por el aire. Entonces se tiene, encerrada en el tubo, una masa de aire de volumen conocido, á la presión atmosférica del momento.

Después se levanta el tubo (fig. 178), hasta que, por efecto de la diminución de presión, el volumen final del aire AC pase á ser doble del inicial AB. Pero entonces se observa que el mercurio sube en el tubo hasta una altura CD, que resulta igual á la mitad de la columna barométrica. De modo que el aire, cuyo volumen ha doblado, no está ya sino á una media presión atmosférica; pues lo que equilibra la presión atmosférica exterior es la fuerza elástica de este aire, unida al peso de la columna CD.

Análogamente se puede elevar el tubo hasta que el volumen del aire haya triplicado : en este momento se observa que la columna de mercurio obtenida es igual á los 2/3 de la altura barométrica, y, como el peso del mercurio elevado, unido á la fuerza elástica del gas, equilibra la presión atmosférica, resulta de ahí que esta fuerza elástica equivale á 1/3 de atmósfera.

169. **Expresiones analíticas de la ley de Mariotte.** — 1°. Si V_0 y V_1 son los volúmenes bajo las presiones P_0 y P_1, la ley que acabamos de formular se expresa evidentemente por la relación

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1}{P_0} \quad \text{ó bien} \quad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1.$$

2°. Estas relaciones pueden escribirse de otro modo :

$$P_0 V_0 = P_1 V_1.$$

Designando por V_0, V_1, V_2, V_3.... los volúmenes bajo las presiones P_0, P_2, P_3, P...., se tiene

$$P_0 V_0 = P_1 V_1 = P_2 V_2 = P_3 V_3 = ...,$$

lo que puede enunciarse de este modo : *El producto del volumen por la presión es un número constante.*

3°. En fin, como es evidente que bajo estas diversas presiones el peso p del gas no cambia, se tendrá, designando por D_0, D_1, D_2, D_3.... los pesos específicos correspondientes

$$p = V_0 D_0 = V_1 D_1 = V_2 D_2 = ...,$$

por consiguiente

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{D_1}{D_0}$$

y como $\frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1}{P_0}$, se tendrá

$$\frac{D_1}{D_0} = \frac{P_1}{P_0}.$$

Así se obtiene este tercer enunciado de la ley de Mariotte : *Los pesos específicos de una masa dada de gas son, á temperatura constante, proporcionales á las presiones que aquélla soporta.*

170. **Estudio crítico de la ley de Mariotte. — Experiencias anteriores á las de Regnault.** — Gran número de físicos siguieron á Mariotte y Boyle en el estudio de la compresibilidad de los gases. Sin embargo, como la mayor parte de los trabajos anteriores á Regnault no presentan en la actualidad sino interés puramente histórico, nos limitaremos á mencionarlos.

Después de los experimentos contradictorios de Muschenbrock, Sulzer y Robinson, Œrsted y Swendsen probaron en 1826 que el ácido sulfuroso es más compresible que el aire ; Despretz confirmó este resultado y lo aplicó al gas cianógeno, al amoniaco y al ácido sulfhídrico ; más adelante, Pouillet confirmó estas conclusiones hasta 100 atmósferas, las extendió al ácido carbónico, y descubrió que en estos límites de presión, el nitrógeno, el hidrógeno y el óxido de carbono se comprimen de manera análoga al aire : su método era puramente comparativo.

Por fin, Dulong y Arago instalaron en el torreón del liceo Enrique IV un aparato por medio del cual experimentaron con el aire hasta 27 atmósferas, hallando que, en estos límites de presión, el aire sigue la ley de Mariotte con escasas diferencias que les pareció poder atribuir á errores de observación, si bien *todas* ellas fueron en el sentido de una compresibilidad mayor que la exigida por la ley de Mariotte.

171. **Experiencias de Regnault.** — Regnault dió á conocer en 1847 experimentos sobre la compresibilidad de los gases, que forman época en la ciencia. Su aparato, muy parecido al de Dulong y de Arago, presentaba numerosas mejoras de detalle ; su método permitía ponerse al abrigo de todas las causas de error

inherentes á los métodos de los precedentes experimentadores ó al menos tenerlas en cuenta.

1°. *Aparato.* — La figura 179 representa el conjunto del aparato de Regnault y algunos de sus más importantes detalles.

Los tubos A y B se encuentran yuxtapuestos paralelamente y fuera de la bomba de mercurio H. Entre los tubos y el depósito está una llave de fundición R, para poner las dos columnas de mercurio al abrigo de las pérdidas que podrían producirse por salida en la bomba mientras dura una observación.

El tubo manométrico B es de cristal y tiene 3 metros de largo; se le afora y se le divide en milímetros; una raya ó marca lo hace en dos partes de igual capacidad. Está cerrado en su parte superior por una llave *p* de acero, que sirve para llenarlo de un gas cualquiera, á presión determinada. Consérvase este gas en un depósito V, mantenido por un baño de agua corriente á temperatura constante; ahí se le comprime con la máquina de compresión P.

La presión se mide por medio de una columna A de ocho tubos de cristal, cada uno de ellos iguales á B, perfectamente equilibrada como en el aparato de Dulong. La reunión de los tubos se efectúa por un sistema de ajuste extremadamente sencillo, que Regnault llamó *collar de garganta.* Las extremidades de los tubos que van á unirse semastican en dos golletes separados de hierro de base cónica y entre las dos bases de los conos en contacto se interpone un redondel de cuero. Esas bases son abarcadas y comprimidas por el collar, que presenta interiormente una ranura de forma de garganta bicónica, de abertura algo más aguda que las de las bases de los tubos. Este collar está formado por dos partes articuladas alrededor de una visagra, y que pueden alejarse ó acercarse por medio de un tornillo. Apretando á éste, se ejerce presión considerable y se obtiene cerradura hermética.

2°. *Método.* — El método fué esencialmente distinto del de Dulong y Arago. En efecto, éstos operaron lo mismo que el abate Mariotte, quiere decir, reduciendo cada vez más el volumen ocupado por una misma masa de gas. Ahora bien, los errores que cometían en cada observación del volumen reducido eran sensiblemente constantes. Supongamos que su suma fuera igual á 1/2 centímetro, lo que equivalía apenas al $\frac{1}{400}$ del volumen inicial, que era de 2 metros : *era pues, un error despreciable.* Pero cuando en virtud de presión unas 20 veces mayor era reducido de volumen á $\frac{1}{20}$ de 2 metros, entonces el mismo error representaba $\frac{1}{20}$ del volumen gaseoso, *alcanzando por consiguiente el orden de magnitud de las divergencias que era posible sospechar entre la ley de Mariotte y la ley de compresibilidad.*

Regnault suprimió esta causa de error creciente operando, no con una misma masa de gas, sino con masas de gas variables, cuyos volúmenes eran reducidos sucesivamente en proporción constante, de 2 á 1 poco más ó menos. Se llenaba primero el volumen total V_0 del manómetro con cierta masa de gas á la presión P_0; después se comprimía el gas por medio de la bomba de mercurio, hasta reducir su volumen á V_1 ($V_1 = \frac{1}{2} V_0$ próximamente), y se medía la presión lineal P_1, dada por la distancia vertical de los dos niveles de mercurio. Esto constituía una primera serie de medidas. Efectúabase otra llenando de nuevo el volumen V_0 con otra masa del mismo gas, á la presión P'_0 ; reducíase el volumen á V_1 (ó V'_1 algo distinto de V_1), y se medía una presión final P'_1, y así sucesivamente. Operando de este modo, siempre con los mismos volúmenes V_0 y $\frac{1}{2} V_0$ bastante considerables, el error absoluto era muy pequeño, y el relativo constante : *de manera que la sensibilidad del método no iba disminuyendo.*

3°. *Correcciones.* — La precisión del método aumentó más todavía por efecto de cierto número de correcciones á que fueron sometidos los resultados brutos de las medidas.

Corrección barométrica. — La presión atmosférica se leía al efectuar cada experiencia en un barómetro colocado al pie de la torre. Sea H esta lectura (que suponemos reducida á cero); ahora bien, lo que importa calcular es la presión en el vértice de la columna mercurial en el tubo grande : ésta sería evidentemente más pequeña que H, é igual por ejemplo á $H - h$. Cometíase, pues, un error por exceso. Se determinaba h aplicando la fórmula barométrica simplificada. Para una altura de la columna mercurial de 22 metros y una presión H igual á 760 mm, se tenía $h = 2{,}092$ mm.

Corrección de compresibilidad. — Siendo el mercurio sensiblemente compresible, la densidad no era constante en toda la longitud de la columna mercurial; las capas inferiores presentaban mayor densidad que las superiores. De ahí resultaba evidentemente un error por defecto en la evaluación de la presión con arreglo á la altura de la columna. Así es que Regnault transformaba la altura observada en lo que hubiera sido de no tener compresibilidad el mercurio y de conservar en todas partes su densidad normal, á 0° y bajo la presión de 760 mm. La corrección era en consecuencia positiva; se redujo á 1, 2 mm. para una altura total de 22 m.

Corrección de temperatura. — La temperatura del agua fría que circulaba en el recipiente no era rigurosamente constante en el tiempo que duraba una misma serie de experiencias. Precisaba, pues, reducir los volúmenes del gas á lo que hubieran sido de permanecer constante la temperatura.

4°. *Resultados.* — Si la ley de Mariotte *se aplicara á un gas determinado*, deberíamos tener para toda la serie de las medidas que le conciernen:

$$V_0 P_0 = V_1 P_1,\ V'_0 P'_0 = V'_1 P'_1, \text{etc.}$$

$$\text{ó}\ \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 = \frac{V'_0 P'_0}{V'_1 P'_1} = \ldots \text{etc.}$$

Por el contrario, si el gas

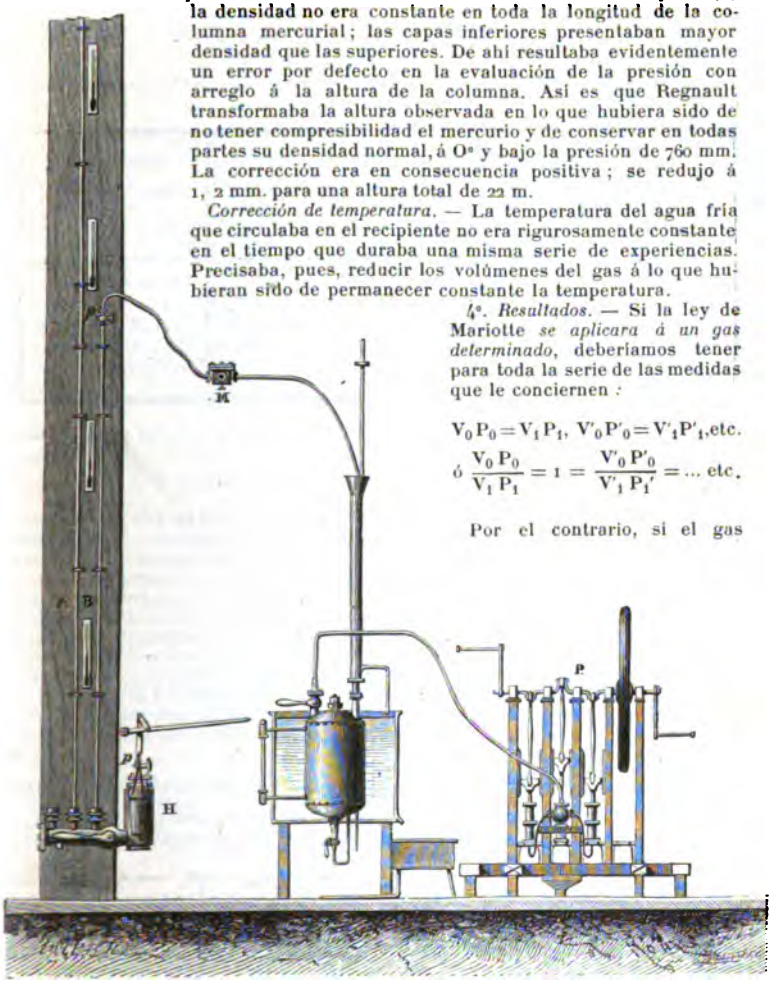


Fig. 179.

uera *más compresible* de lo que indica la ley de Mariotte, se debería tener

$$\frac{V_0}{V_1} > \frac{P_1}{P_0} \qquad \text{ó} \qquad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} > 1,$$

desigualdades que se pueden expresar por la igualdad

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 + \varepsilon.$$

Finalmente, si el gas fuera *menos compresible*, se debería tener

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} < 1, \qquad \text{ó bien} \qquad \frac{V_0 P_0}{V_1 V_1} = 1 - \iota.$$

Veamos ahora el cuadro de una serie de experimentos efectuados con el aire, el nitrógeno, el ácido carbónico y el hidrógeno.

AIRE		NITRÓGENO		ÁCIDO CARBÓNICO		HIDRÓGENO	
P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$	P_0	$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$
mm		mm		mm		mm	
738,72	1,001414	753,46	1,000988	764,03	1,007597	»	»
2112,53	1,002765	4953,92	1.002952	3186,13	1,028698	2211,18	0,998584
4140,82	1,003253	8628,54	1,004768	4879,77	1,045625	5845,18	0,996121
9336,41	1,006366	10981,42	1,006456	9619,97	1,155865	9176,50	0,992933

La comparación de estos números condujo á Regnault á las conclusiones siguientes :

1°. El cociente $\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$ no es igual á 1 con ninguno de estos cuatro gases : *luego, no obedecen rigurosamente á la ley de Mariotte.* Como la diferencia es pequeña, puede decirse que la divergencia entre la ley de Mariotte y la verdadera ley de compresibilidad no es demasiado grande. Puede despreciársela para las presiones escasas ; pero se acentúa á medida que la presión del gas aumenta.

2°. ι es positivo para el aire, el nitrógeno y el ácido carbónico : luego *estos tres gases son más compresibles de lo que indica la ley de Mariotte.* Para el hidrógeno ι es negativo : *luego este gas es menos compresible;* pero la divergencia disminuye cuando la presión aumenta, al contrario de lo que ocurre con los demás gases.

3°. Todos los demás gases estudiados por Regnault se conducen como el aire, siendo más compresibles de lo que indica la ley de Mariotte. La divergencia es mucho mayor en los gases liquidables, tales como el ácido carbónico, el ácido, sulfuroso, el gas amoniaco, el cianógeno, que en los gases llamados antaño *permanentes.*

4°. La ecuación simple $\frac{V_0 P^0}{V_1 P_1} = 1$, que expresa la ley de Mariotte no se aplica por tanto á ningún gas. Regnault ha deducido de estos experimentos una fórmula empírica que representa la ley de compresibilidad de algunos gases. Hela aquí :

$$\frac{V_0 P_0}{VP} = 1 \pm A\left(\frac{V_0}{V} - 1\right) \pm B\left(\frac{V_0}{V} - 1\right)^2 :$$

A y B son constantes cuyos valores *son diferentes para cada gas* y *extremadamente pequeños* para todos.

172. **Experiencias posteriores á las de Regnault.** — 1°. *Experiencias de Natterer.* — Natterer, físico de Viena, operó hasta con 2700 atmósferas al tratar de reducir á líquidos los gases llamados entonces *permanentes.* Aunque sus métodos no eran susceptibles de gran precisión, llegó á obtener este importante resultado : el aire, el oxígeno, el nitrógeno y el óxido de carbono, que empiezan por comprimirse *más* de lo indicado por la ley de Mariotte (según Regnault), acaban al contrario, cuando son grandes las presiones, por hacer como el hidrógeno, esto es, que se comprimen *menos* de lo indicado por la ley.

2°. *Primeras experiencias de Cailletet.* — Estos resultados fueron confirmados más adelante, en 1870, por Cailletet, en una serie de experimentos en que la presión fué llevada hasta 700 atmósferas. El método consistía en comprimir el gas en un piezómetro de vidrio contenido en un tubo de acero (tubo laboratorio) lleno de mercurio, que subía en el vástago del piezómetro durante la compre-

sión; ese vástago se cubría previamente con una ligera capa de oro que el mercurio disolvía al subir : así se juzgaba del volumen ocupado por el gas durante la compresión, según el punto del vástago hasta donde el oro había sido disuelto por el líquido. Las presiones se medían con un manómetro género Desgoffe. Desgraciadamente, las indicaciones suministradas por este aparato, tal como entonces lo construían, dejaban mucho que desear; para hacer que cesara esta incertidumbre, lo más seguro era operar con manómetros de aire libre de altura muy grande ; con este objeto se emprendieron otras experiencias, las nuevas de Cailletet y las de Amagat.

3°. *Nuevas experiencias de Cailletet.* — Éstas se efectuaron (1879) en el pozo artesiano de la Butte-aux-Cailles. El procedimiento de lectura de los volúmenes es el del vástago dorado (lo mismo que antes). El tubo-laboratorio estaba atornillado en la extremidad de un largo tubo de acero estirado, flexible, arrollado sobre una especie de torno dispuesto en el orificio del pozo, lleno de mercurio y terminado en la parte superior por un depósito lleno de este líquido; hacíase bajar el tubo laboratorio al pozo soltando el de acero; de este modo se obtenía una columna vertical de mercurio de longitud variable y conocida; para leer cada vez se necesitaba subir el tubo-laboratorio y retirar de su seno el piezómetro, á fin de ver hasta qué altura había subido el mercurio en el vástago dorado. Así se operó hasta una profundidad de 182 metros, ó sea 240 atmósferas. La profundidad total del pozo era de 500 metros. Estos ensayos se efectuaron con el nitrógeno, encontrándose el máximum del producto PV bajo una presión de unas 80 atmósferas.

4°. *Experiencias de Amagat* (1879). — Estas experiencias se efectuaron en un pozo de mina, el de Verpilleux, cerca de Saint-Etienne. Su autor siguió método que podemos llamar *inverso* del anterior.

El aparato (fig. 180), estaba instalado en una galería subterránea, á 327 metros por debajo de la superficie del suelo. Una bomba SS'P repelía (por mediación de agua mezclada con glicerina) al mercurio R, colocado en el depósito sobre el cual aquélla está montada, por una parte en el piezómetro A donde está el gas y que se ve á la izquierda, y por otra parte en un tubo de acero, cuyo principio CO es lo único perceptible en el dibujo : este tubo, hecho con pedazos reunidos por enlaces de tuercas (representamos la primera TT'), estaba sujeto á las paredes del pozo en toda su longitud ; la lectura de los volúmenes se efectuaba pues directamente en el vástago graduado del piezómetro, como en los experimentos de Biot y Arago ó en los de Regnault. Para medir la columna de mercurio subían los ayudantes en el canasto de la mina hasta cada enlace *d*, lo deshacían y atornillaban en vez de la tuerca superior una pieza que sostenía un tubo de vidrio *b* ; entonces se daba á la bomba, hasta que el mercurio llegara á este tubo; una vez establecido el equilibrio de temperatura y leído el volumen, el ayudante rehacía el enlace, subía á la estación siguiente y así en lo sucesivo. La temperatura de la columna estaba dada por una serie de termómetros escalonados en los enlaces sucesivos, la del gas por el termómetro del tubo envolvente MM, que rodeaba el vástago graduado y por el cual pasaba continuamente una corriente de agua. Para las presiones inferiores á 80 atmósferas se hicieron las experiencias con arreglo al mismo método en una de las torres de la iglesia de Fourviére en Lyon. El conjunto de los resultados obtenidos se encuentra en el cuadro siguiente :

P	PV	P	PV	P	PV	P	PV
atm.		atm.		atm.		atm.	
1,00	1,0000	65,80	0,9897	168,80	1,0293	500	1,3768
26,22	0,9930	72,37	0,9902	208,63	1,0557	1000	2,0160
32,90	0,9919	78,95	0,9908	251,13	1,0875	1500	2,6258
39,47	0,9908	85,53	0,9913	290,93	1,1254	2000	3,2093
46,05	0,9899	90,97	0,9929	332,04	1,1668	2500	3,7708
52,63	0,9896	109,17	0,9975	373,30	1,2110	3000	4,3138
59,21	0,9895	126,90	1,0248	430,77	1,2740	—	—

(I

(II)

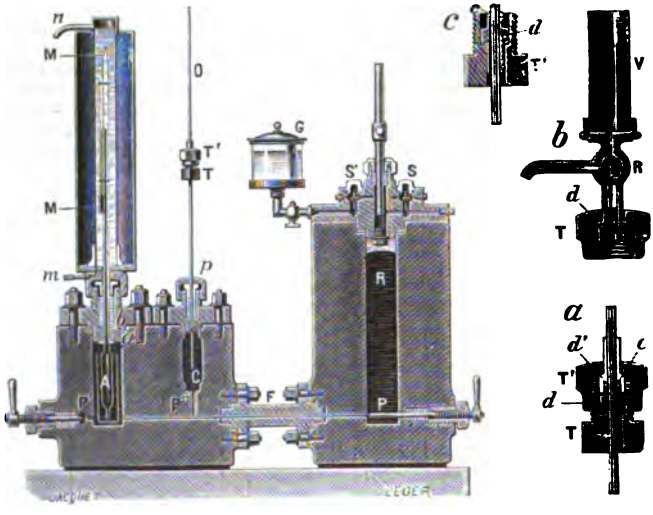


Fig. 180.

Aparato Amagat. — I, perspectiva ; — II, sección y pormenores.

Estos resultados se diferencian notablemente (en los límites comunes de presión) de los que obtuvo Cailletet.

Conocida la compresibilidad del nitrógeno, Amagat pudo estudiar por comparación en el laboratorio la de otros diversos gases : hidrógeno, oxígeno, aire, óxido de carbono, formeno, etileno, ácido carbónico; á todos estos gases corresponde á la temperatura ambiente (excepto á los dos últimos que se liquidan, el etileno por debajo de 10°) un mínimum del producto PV, no contando al hidrógeno, con el cual va siempre aumentando ese producto. El cuadro suplementario que indica la continuación de esos productos para el ázoe hasta 3000 atmósferas está tomado de otro trabajo de Amagat. Obsérvase que con esta presión, el producto PV (y en consecuencia la presión para el volumen correspondiente) es cuatro veces mayor que si el gas siguiera la ley de Mariotte; para el hidrógeno

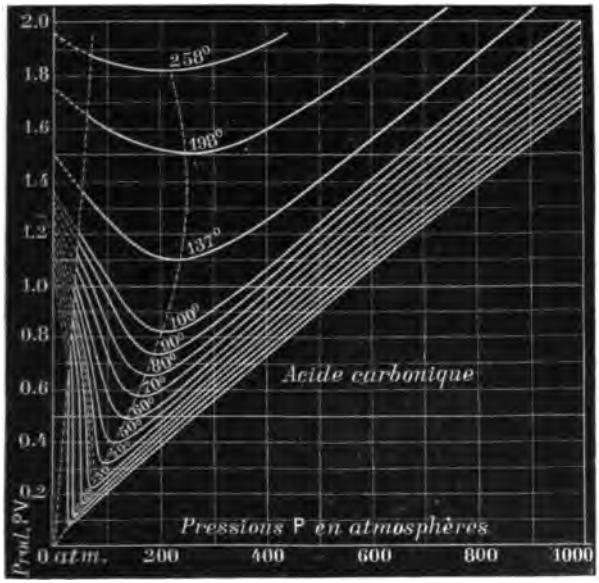


Fig. 181.

sólo parece ser de 2,8754. Por tanto, este gas, que al principio es menos compresible que el nitrógeno, se vuelve al contrario más compresible que esté bajo presiones considerables; á 3000 atmósferas, los coeficientes de compresibilidad de los gases, nitrógeno, aire, oxígeno, difieren muy poco y son del orden de magnitud de los coeficientes de los líquidos; bajo esta presión, la densidad del nitrógeno referida á la del agua es 0,839, la del hidrógeno 0,090, la del oxígeno 1,128, la del aire 0,897.

173. **Compresibilidad á las diversas temperaturas.** — Los experimentos que acabamos de describir fueron efectuados á la temperatura ambiente; ya en 1869 estudió Andrews el ácido carbónico á diversas temperaturas comprendidas entre 10° y 50°. Como estos trabajos tuvieron por principal objeto la continuidad del paso del estado líquido al gaseoso, volveremos á examinarlos cuando se trate del punto crítico; por lo demás, fueron efectuados dentro de límites de temperatura y de presión demasiado estrechos para que puedan expresar el conjunto de las leyes de la compresibilidad propiamente dicha.

Experiencias de Amagat — Amagat emprendió el mismo estudio en límites muy

(I

(II)

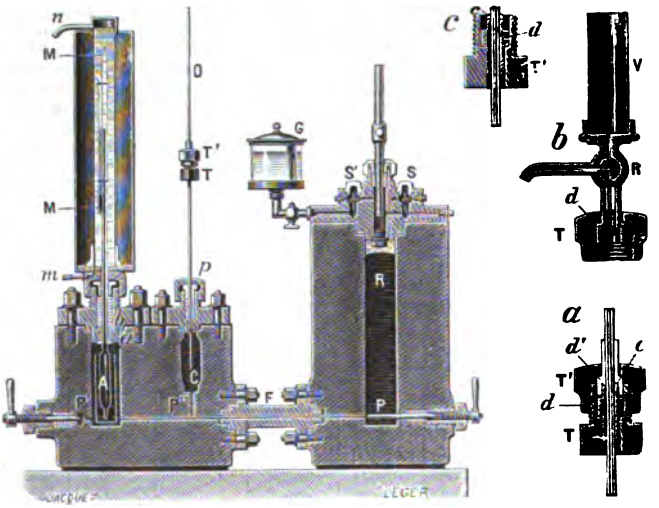


Fig. 180.

Aparato Amagat. — I, perspectiva ; — II, sección y pormenores.

Estos resultados se diferencian notablemente (en los límites comunes de presión) de los que obtuvo Cailletet.

Conocida la compresibilidad del nitrógeno, Amagat pudo estudiar por comparación en el laboratorio la de otros diversos gases : hidrógeno, oxígeno, aire, óxido de carbono, formeno, etileno, ácido carbónico; á todos estos gases corresponde á la temperatura ambiente (excepto á los dos últimos que se liquidan, el etileno por debajo de 10°) un mínimum del producto PV, no contando al hidrógeno, con el cual va siempre aumentando ese producto. El cuadro suplementario que indica la continuación de esos productos para el ázoe hasta 3000 atmósferas está tomado de otro trabajo de Amagat. Obsérvase que con esta presión, el producto PV (y en consecuencia la presión para el volumen correspondiente) es cuatro veces mayor que si el gas siguiera la ley de Mariotte; para el hidrógeno

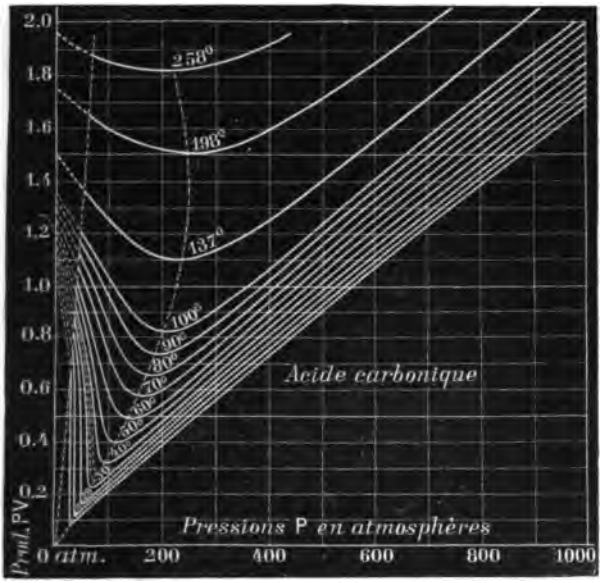


Fig. 181.

sólo parece ser de 2,8754. Por tanto, este gas, que al principio es menos compresible que el nitrógeno, se vuelve al contrario más compresible que esté bajo presiones considerables; á 3000 atmósferas, los coeficientes de compresibilidad de los gases, nitrógeno, aire, oxígeno, difieren muy poco y son del orden de magnitud de los coeficientes de los líquidos; bajo esta presión, la densidad del nitrógeno referida á la del agua es 0,839, la del hidrógeno 0,090, la del oxígeno 1,128, la del aire 0,897.

173. **Compresibilidad á las diversas temperaturas.** — Los experimentos que acabamos de describir fueron efectuados á la temperatura ambiente; ya en 1869 estudió Andrews el ácido carbónico á diversas temperaturas comprendidas entre 10° y 50°. Como estos trabajos tuvieron por principal objeto la continuidad del paso del estado líquido al gaseoso, volveremos á examinarlos cuando se trate del punto crítico; por lo demás, fueron efectuados dentro de límites de temperatura y de presión demasiado estrechos para que puedan expresar el conjunto de las leyes de la compresibilidad propiamente dicha.

Experiencias de Amagat — Amagat emprendió el mismo estudio en límites muy

abierto. Este tipo corresponde precisamente á la columna de mercurio de los aparatos que acabamos de mencionar en el estudio de la compresibilidad de los gases. Son los manómetros más exactos, y conviene comparar á ellos los demás tipos, cada vez que sea posible.

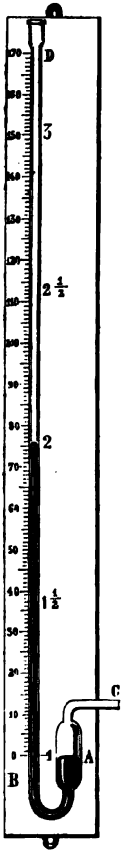


Fig. 183.

2°. Los *manómetros de aire comprimido*, en que la fuerza elástica que se trata de medir es equilibrada por la de una masa de aire comprimida en un vaso cerrado y que se toma como término de comparación.

3°. Los *manómetros metálicos*, en que la fuerza elástica mensurable es equilibrada por la elasticidad de un muelle circular que se arrolla ó se extiende más ó menos, como el del barómetro de Bourdon.

La unidad de medida ordinaria para las presiones ó tensiones de los gases es la *atmósfera*, tal como ya la hemos definido. Se ha visto (145) qne esta presión es igual á 1,033 kg. por centímetro cuadrado; de consiguiente, cuando se dice que un gas tiene tensión de 2 ó 3 atmósferas, esto significa que ejerce sobre cada centímetro cuadrado de las paredes de su recipiente una presión igual á 2 ó 3 veces 1,033 kg.

176. **Manómetro de aire libre ordinario.** — *Descripción.* — Este aparato consiste en un tubo de cristal abierto, que comunica libremente con la atmósfera por su extremidad superior y que por la inferior se une á un depósito A, de gran diámetro. Éste se pone en comunicación por medio de un tubo C más estrecho con el recipiente cerrado donde está el gas cuya tensión de desea medir. El depósito A está lleno de mercurio, y los diferentes órganos se fijan en una tableta que se instala verticalmente. El depósito A es, ya un cilindro de hierro (fig. 183), que forma la continuación del tubo recto, como el depósito de un barómetro de sifón, ya una cubeta de fundición, medio llena de mercurio (fig. 184), en la cual penetra directamente el tubo manométrico, como si fuera el de un barómetro ordinario; el vapor ó el gas llega en este caso por un conducto *a*, y va á ejercer su presión en la superficie libre del mercurio.

Graduación — Para graduar el manómetro se deja al orificio C en comunicación con la atmósfera y en el nivel donde se para entonces el mercurio en el tubo de cristal se marca el número 1, que indica 1 atmósfera; después, á partir de ahí, y de cada 76 en 76 centímetros, se ponen los números 2, 3, 4, 5, 6....., que indican 2, 3, 4, 5, 6..... atmósferas. Por fin cada uno de los intervalos, 1 á 2, 2 á 3, etc., se dividen en 10 partes iguales, que indican décimos de at-

mósfera, marcándolos á la derecha del tubo. Los números de la izquierda expresan las presiones en centímetros de mercurio.

Observación. — Nótese que se desprecian por completo las variaciones del nivel en la cubeta. De manera que no se trata aquí de un instrumento de precisión como el barómetro.

177. **Pequeño manómetro de aire libre**. — Otro modelo distinto de manómetro de aire libre sirvió á Regnault para las presiones que no pasaban de 3 atmósferas. Componíase de dos anchos tubos de vidrio, A y B (fig. 185), masticados en las ramas A′ y B′ de una pieza de fundición, encorvada dos veces en ángulo recto, taladrada por un canal interior y provista de una llave R de

Fig. 184.

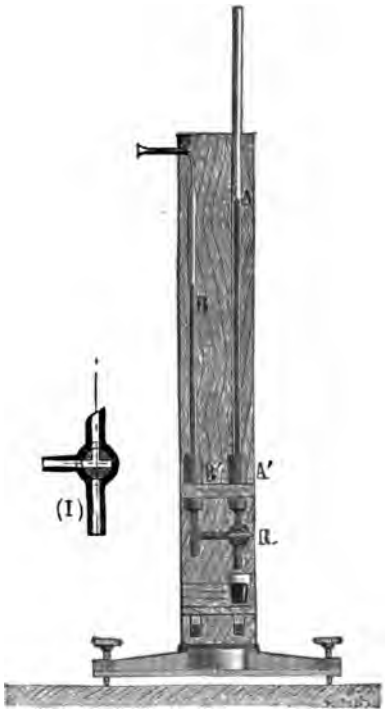


Fig. 185.

tres salidas. De manera que el conjunto forma un sistema de vasos comunicantes donde se puede echar mercurio. El tubo mayor está libremente abierto al aire; el menor B puede comunicar, mediante un collar de garganta, con el recipiente donde está el gas cuya presión se quiere medir. Una vez establecida esta comunicación, hallándose la llave en la posición normal (representada en I), la presión del gas se transmite al mercurio de la rama mayor: el nivel sube en A, al paso que baja en B; la diferencia de estos niveles, h_0 (reducida á 0°), y aumentada con la altura barométrica actual (tam-

bién reducida á 0°), mide exactamente la fuerza elástica del gas. Tiénese

$$F = h_0 + H_0$$

Determínase h_0, sea por medio de escalas de milímetros trazadas en los tubos mismos, sea, para mayor precisión, mediante lecturas hechas con el catetómetro.

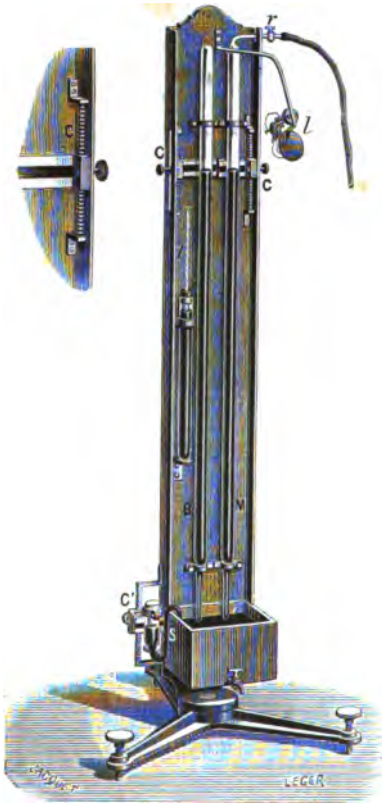


Fig. 186.

Todo el aparato se fija en una tabla vertical, que se coloca sobre una peana mantenida por tornillos de nivel.

178. **Manómetro barométrico ó barómetro diferencial de Regnault** (*Modelo de A. Leduc*). — Regnault adoptó para las tensiones pequeñas un manómetro que es una modificación de su barómetro normal. He aquí el modelo de este instrumento, usado por A. Leduc en el laboratorio de la Sorbona.

Al lado del tubo barométrico propiamente dicho B, provisto de un sifón S, como el barómetro normal de A. Leduc (151), se encuentra fijo un segundo tubo M de igual diámetro y terminado también en una punta fina que penetra en la misma cubeta (fig. 186). Este tubo manométrico se encuentra en comunicación por su parte superior con un gollete de llave que lo pone en relación con el recipiente donde está contenido el gas de escasa tensión. Mientras mayor es la rarefacción en éste, más sube el mercurio en el tubo *a*, y la diferencia de nivel en los tubos *b* y *a* es lo que da á conocer la tensión, que se mide con el catetómetro. La lectura se facilita gracias al empleo de correderas como C, provistas de miras especiales, (banda negra entre dos bandas blancas) que se llevan detrás del nivel mercurial, y por una lámpara de incandescencia que ilumina la mira

179. **Gran manómetro de aire libre de la torre Eiffel.** — Cailletet ha instalado hace poco en la torre Eiffel un gran manómetro de aire libre análogo al de Amagat (172, 4). Puede medir directamente hasta 400 atmósferas.

Está constituido por un tubo de acero de 4,5 mm. de diámetro próximamente que, partiendo del estribo oeste de la torre, sube hasta la 1ª. plataforma á lo largo del plano inclinado de uno de los rieles del ascensor. Entre la 1ª. y la 2ª. plataforma, el tubo corre apoyándose en la escalera helicoidal; y desde la 2ª plataforma al vértice hace lo mismo á lo largo de la escalera vertical de forma de hélice.

Unos tubos de vidrio de varios metros de largo están dispuestos de 3 en 3 metros, y comunican con el tubo de acero por medio de llaves cónicas de tornillos.

Se hace subir el mercurio en el manómetro por compresión de agua. El recipiente del azogue y la bomba que sirven con este objeto se encuentran instalados en un laboratorio del estribo oeste. En esta misma estación se ha dispuesto un manómetro metálico, graduado en atmósferas y en que están inscritos los números de orden de los tubos sucesivos, manómetro que indica á cada instante cual es el tubo de vidrio lateral á que ha llegado el nivel del mercurio. Entonces basta con abrir la llave correspondiente que pone en comunicación el tubo de acero con el de vidrio para poder leer con el anteojo en una regla de madera charolada la altura manométrica.

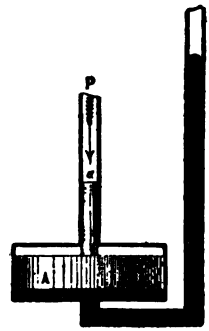


Fig. 187.

180. **Manómetros de líquidos menos densos que el mercurio.** — Para la medida de las presiones pequeñas conviene reemplazar el mercurio, en los manómetros de aire libre, por un líquido menos denso, con tal de que éste no emita vapores sensibles á la temperatura ordinaria. Tomando el ácido sulfúrico, que satisface estas condiciones y que es unas 7 veces y 1/2 menos denso que el mercurio, un cambio de presión será expresado por una columna líquida 7 veces y 1/2 más alta que la del mercurio : así se obtendrá, por consiguiente, un instrumento *siete veces y media más sensible* que el manómetro ordinario, ó que permitirá valorar, *con análoga precisión*, presiones *siete veces y media menos considerables.*

Con un manómetro de agua se obtendría sensibilidad 13 veces y 1/2 mayor.

181. **Manómetro llamado de Desgoffe.** — Este instrumento, imaginado por Galli-Cajalat, es una aplicación del principio de Pascal, lo mismo que la *prensa hidráulica*, pero de cierto modo *en sentido inverso.*

Principio. — Sea P el valor, por centímetro cuadrado, de la presión que se trata de medir. En vez de hacer actuar directamente esta presión sobre el nivel mercurial en la cubeta, se la aplica en la cara superior *a* de un émbolo macizo, cuya cara inferior descansa sobre la superficie del mercurio (fig. 187). Pues bien, mientras la sección *s* de la cabeza del émbolo es muy pequeña, la sección S de su base es muy ancha; de ahí resulta que la presión transmitida al mercurio, por unidad de superficie, no será ya sino una fracción de P, igual á $P\frac{s}{S}$. En consecuencia, si la columna mercurial necesaria para equilibrar á P ha sido H, la que hará contrapeso á la presión $P\frac{s}{S}$ será $h = H\frac{s}{S}$.

Suponiendo que $S = 100\,s$, será posible equilibrar y medir una presión de 500 *atmósferas* con una columna de mercurio igual únicamente á cinco veces 0,76ᵐ, ó sean 3,80 metros.

Pormenores de construcción. — La cabeza del émbolo es un cilindro de acero *a* que se mueve dentro de otro de bronce, del cual sale atravesando un cuero embutido (fig. 188); la base del émbolo está formada por un ancho disco metálico A, que cierra completamente la rama menor del manómetro. El émbolo y el mercurio están separados por un disco de caucho, que descansa á su vez, no directamente sobre el azogue, sino en ligerísima capa de agua

El diámetro de la rama menor es tan grande respecto del de la mayor que cuando el mercurio sube hasta 4,30 m. en ésta, sólo baja un quinto de milímetro en aquélla (experiencias de Cailletet).

182. **Manómetro de émbolos libres y líquidos viscosos de Amagat.** — El manómetro de Desgoffe presenta varias causas de errores graves : el diámetro del émbolo grande no está bien definido ; la membrana es en su movimiento objeto de un trabajo que habría de tenerse en cuenta ; por fin, el émbolo menor, que debería ser completamente libre, se mueve con irregularidad, por sacudidas, por hallarse muy apretado en su caja de cueros.

M. Amagat ideó un manómetro donde se encuentran eliminadas todas estas causas de error, mediante el conveniente empleo de cuerpos viscosos. Los dos émbolos (fig. 188) envueltos por rozamiento suave en sus estuches metálicos,

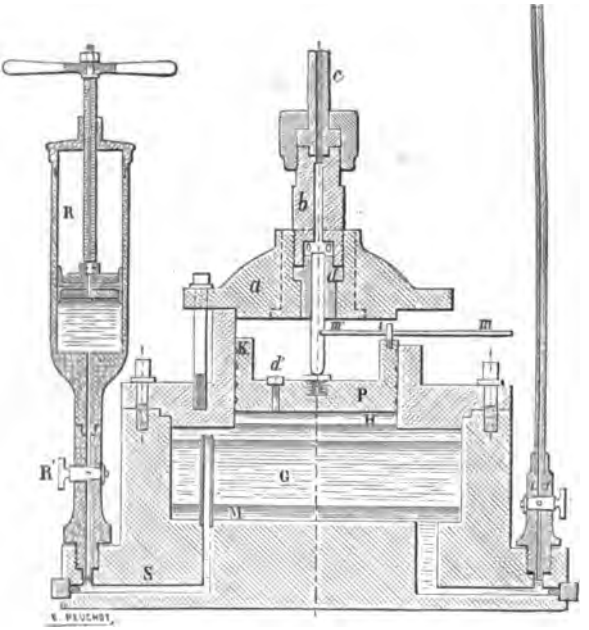


Fig. 188.

están enteramente libres; el mayor PK descansa sobre una capa de aceite de palmacristi que lo lubrifica y es bastante viscosa para mantenerlo seco; obtiénese resultado análogo con el émbolo pequeño (previamente untado de aceite) mediante una capa de miel que se coloca en una cavidad fácil de ver en su parte superior *oo*. Para eliminar completamente el efecto de inercia que se debe á los rozamientos, hay un dispositivo, fácil de comprender con sólo examinar la figura y que permite, en el momento de las lecturas, imprimir á los dos émbolos un ligero movimiento angular por medio de un vástago de acero *mm'* atornillado en el émbolo menor y que arrastra al grande por medio de dos clavijas *i*. Una bomba reguladora R permite mantener el émbolo grande á conveniente altura, por la inyección de cantidad proporcionada de aceite debajo de él.

Cuando este aparato está bien construído, funciona regularmente hasta presiones muy altas; en las experiencias de Amagat llegó á más de 3000 atmósferas.

183. **Manómetros de aire comprimido.** — Los manómetros de aire comprimido son al mismo tiempo aparatos industriales, por razón

de su uso, y de precisión, por motivo de su modo de graduación, que es susceptible de mucha exactitud.

Todos ellos se reducen esencialmente á la rama menor, más ó menos prolongada, del *tubo de Mariotte*.

El tubo manométrico, que sólo alcanza aquí de 60 á 80 centímetros de largo, está cerrado por su parte superior y lleno de aire; por la inferior penetra en un baño de mercurio. Este mercurio se encuentra contenido, ya en una cubeta cilíndrica de hierro donde el tubo penetra recto (fig. 189), ya sencillamente en otro tubo de vidrio, unido con el precedente por una curva en forma de sifón (fig. 190). En el primer caso tiene el depósito de mercurio en la parte superior un orificio donde está sólidamente fijo con mástic el tubo manométrico, y lateralmente un gollete A (fig. 189) por donde se establece la comunicación con el gas ó vapor cuya tensión se desea conocer. En el caso del tubo en forma de sifón, la rama menor está provista lateralmente de un gollete de llave y tornillo, que se puede atornillar directamente en el recipiente de gas ó de vapor.

Fig. 189.

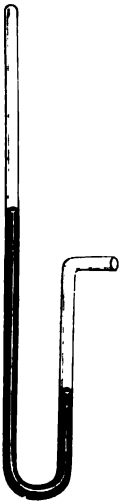


Fig. 190.

Gradúase este manómetro empíricamente comparando su marcha con la de un manómetro de aire libre de altura suficiente.

184. **Manómetros de gases comprimidos para las grandes presiones.** — En este caso se reproduce, aparte algunos detalles de construcción, la parte izquierda del aparato de Amagat, prescindiendo de la columna de mercurio CC (fig. 180). El vástago graduado MM se afora entonces cuidadosamente, lo mismo que el depósito A. Una vez cargado de gas el aparato bajo una presión y á una temperatura conocidas, las presiones se deducirán de los volúmenes por medio de las tablas de compresibilidad de estos gases que hizo Amagat. Precisa naturalmente tener en cuenta las variaciones de temperatura.

El uso de estos instrumentos se encuentra limitado por la resistencia de los vástagos calibrados, que casi nunca pueden soportar sin romperse presiones notablemente superiores á 400 atmósferas.

185. **Manómetros metálicos. — Manómetro de Bourdón.** — Los manómetros de aire comprimido tienen el inconveniente de ser dedemasiado frágiles; así es que casi resulta imposible usarlos en

las máquinas móviles de vapor. Los *manómetros metálicos* son los verdaderamente industriales. Estos aparatos no contienen mercurio y estando hechos de metal por entero, son portátiles, poco molestos y de precio relativamente muy barato.

El primero de estos instrumentos, y el que más se usa todavía, fué el de Bourdón.

Principio. — Fúndase, como el barómetro aneroide, en la deformación que los tubos experimentan por la presión. Cuando se arrolla en espiral y en el sentido de su diámetro menor un tubo de paredes flexibles y ligeramente aplanadas sobre sí mismas, *toda presión interior sobre las paredes tiene por efecto desarrollar el tubo, mientras que toda presión exterior tiene al contrario por efecto arrollarlo más.*

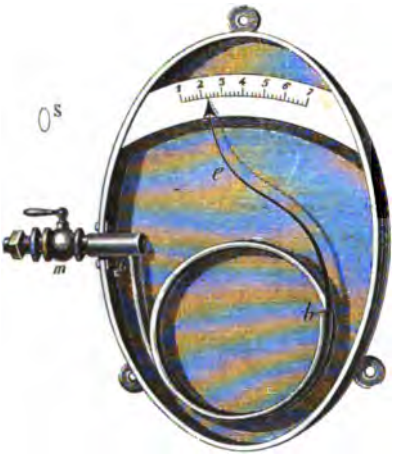


Fig. 191.

Descripción. — El aparato se compone de un tubo de latón de 0,70 m. de largo, de paredes delgadas y flexibles (fig. 191), y encorvado á modo de hélice por espacio de espiral y media. Su sección, que está representada en S á la izquierda de la figura, es una elipse cuyo eje mayor llega á 11 milímetros y á 4 el menor. La extremidad *a*, que se encuentra abierta, está fija en un gollete de llave *m*, destinado á poner el aparato en comunicación con una caldera de vapor. La extremidad *b* es cerrada y está libre, así como todo lo restante del tubo.

Uso. — Abierta la llave *m*, la presión que el vapor ejerce sobre las paredes interiores del tubo lo obliga á desarrollarse. Entonces la extremidad *b* va de izquierda á derecha, y con ella una larga aguja *e*, que marca en una muestra la tensión en atmósferas.

Graduación. — Este cuadrante se gradúa por comparación, sea con un manómetro de aire libre, sea con cualquier otro que dé indicaciones conocidas.

Observación. — Estos aparatos tienen el inconveniente de ir volviéndose más y más inexactos á medida que se les usa. Los órganos metálicos que los constituyen experimentan, bajo la acción de los vapores calientes, alteraciones en su elasticidad que hacen inexactas sus medidas. De manera que resulta indispensable renovar la graduación de tiempo en tiempo.

186. **Manómetros de Cailletet.** — Cailletet usó en sus experiencias sobre la com; presión y la liquidación de los gases, manómetros especiales, propios para medir presiones bastante grandes con muchísima aproximación relativa. He aquí uno de los tipos que imaginó.

El aparato está constituído por un depósito cilíndrico R de vidrio, provisto de un vástago graduado *l*, y lleno de un líquido teñido de color ó bien de mercurio, como un termómetro (fig. 192). Ahora bien, si se somete un recipiente de vidrio de

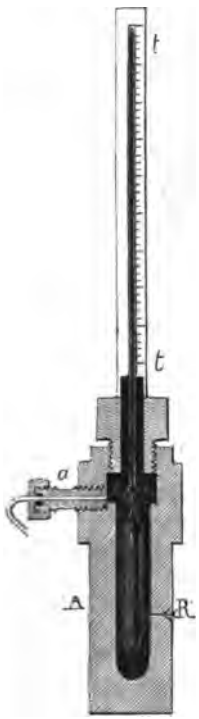


Fig. 192.

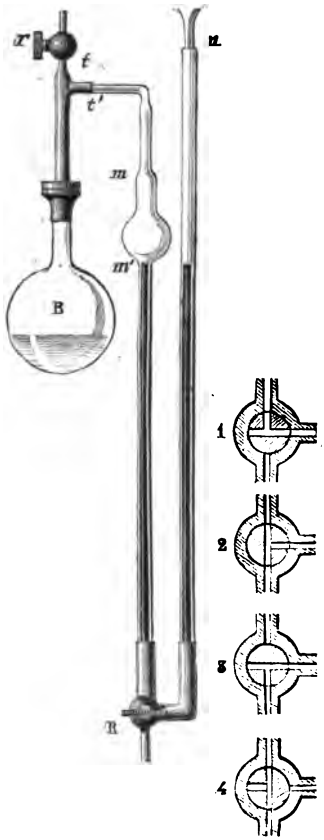


Fig. 193.

esta forma á presiones crecientes, las disminuciones de volumen que sufre el depósito son exactamente proporcionales á los aumentos de presión. Cailletet probó este hecho por experimentos directos, hasta las presiones indicadas por un manómetro de aire libre, cuya rama mayor tenía nada menos que 70 metros de largo. Una vez graduado el vástago del manómetro por estas experiencias previas, basta instalarlo en una especie de recipiente de acero A, que se pone en comunicación por un gollete lateral *a* con la prensa hidráulica ó con el recipiente en que se trata de medir la presión.

187. **Volumenómetro.** — Este aparato, imaginado por Say en 1797, y perfeccio-

nado por Regnault, es una ingeniosa aplicación de la ley de Mariotte. Sirvió en otra época para determinar la densidad de las pólvoras, y ya dijamos por qué motivo (128, 2°). Esta aplicación se ha abandonado.

Descripción. — Metíase la pólvora en un matraz B (fig. 193), que se adaptaba, por medio de un collar de garganta, á un órgano metálico de dos ramas. Una de ellas, *l*, está provista de una llave *r* que permite poner en comunicación la parte interior del globo con la atmósfera; la otra, *l'*, une el matraz de manera permanente con el tubo de vidrio *mm'* R *n*, que es una especie de manómetro de aire libre. Las ramas *m* y *n* se reunen por medio de un tubo metálico, provisto de una *llave de tres salidas*.

Esta llave, que fué inventada por Regnault y que se encuentra en todos sus aparatos, es de uso muy cómodo. Según que se le da vuelta en una de las posiciones 1, 2, 3, 4, se ponen en comunicación las dos ramas *m* y *n* únicamente entre sí, ó bien entre sí y con el exterior, ó bien la rama *n* sola con el exterior, ó bien la rama *mn'* completamente sola con el exterior (fig. 193, 1, 2, 3, 4).

Operación. — Se daba el peso *p* de la pólvora y se determinaba se volumen *u*. — 1°. Introducido el cuerpo en el matraz se vierte mercurio por la rama abierta hasta que los niveles lleguen á la línea horizontal de la marca de referencia *m'*. De esta manera se confina cierta masa de aire, que ocupa, á la presión atmosférica H del momento, un volumen igual á $(V + v - u)$, siendo V la capacidad del matraz y del tubo hasta la marca *m* y *v* la capacidad de la ampliación *mm'*. — 2°. Échase nueva cantidad de mercurio hasta elevarlo á *m* : entonces el nivel en la otra rama pasa de la raya de referencia una altura *h* que mide el exceso de presión correspondiente á la reducción de volumen sufrida por la masa de gas. Ésta ocupa ahora un volumen $V - u$, á la presión $H + h$. Aplicando la ley de Mariotte, se tiene

$$[1] \qquad (V - u)(H + h) = (V = v - u)\,H.$$

Esta es una ecuación de primer grado, de que es fácil deducir el valor de *u*, en función de H, *h* y del cociente $\frac{v}{V}$. Éste se determina repitiendo la misma operación *en blanco*, quiere decir, sin echar pólvora en el matraz, lo que da la ecuación

$$V(H + h') = (V + v)\,H,$$

ó

$$[2] \qquad \left(H + h'\right) = \left(1 + \frac{v}{V}\right) H.$$

Conociendo *p* y *u* se tiene inmediatamente el peso específico D, por la fórmula $D = \frac{p}{u}$.

CAPÍTULO IV

EXPANSIBILIDAD DE LOS GASES.

DIFUSIÓN Y DISOLUCIÓN.

188. **Mezcla de los gases ó Difusión.** — 1°. *Definición del fenómeno.* — La expansibilidad de que están dotados los gases hace que, cuando se les pone en contacto, en vez de separarse como los líquidos por orden de densidades, se mezclan unos con otros íntimamente y permanecen indefinidamente mezclados, aun si no ejercen ninguna

acción química recíproca. Este es el fenómeno de la *difusión de los gases.*

Experiencias de Berthollet. — Este principio fué puesto en evidencia por el químico francés Berthollet, en un experimento célebre. Tomó dos matraces de vidrio (fig. 194) provistos ambos de un gollete de llave que permitía atornillarlos uno encima de otro; llenólos de gases perfectamente secos, uno de hidrógeno, cuya densidad es 0,0692, y el otro de ácido carbónico cuya densidad es 1,529, quiere decir 22 veces mayor; finalmente los colocó de la manera que se ve en la figura en los sótanos del Observatorio, para preservarlos de toda agitación y de las variaciones de temperatura. No se abrieron las llaves hasta que pasó algún tiempo, cuando ya los gases estaban en equilibrio de temperatura con el medio ambiente. Así pues, al cabo de algunas horas separó Berthollet los dos matraces y observó : 1°. que *cada uno de ellos contenía proporciones iguales de hidrógeno y de ácido carbónico;* 2°. que *la presión de la mezcla gaseosa en cada matraz era igual á la presión inicial.*

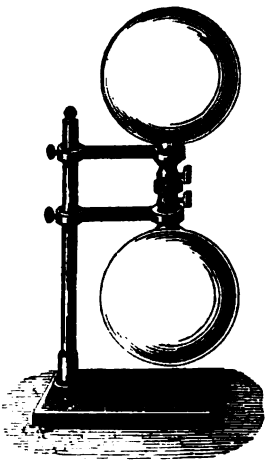


Fig. 194.

Sometiendo á una prueba análoga todos los gases que no ejercen entre sí ninguna acción química, se obtiene el mismo resultado. La experiencia demuestra por otra parte que, *una vez mezclados, los gases no vuelven á separarse, sea cual fuere la diferencia de sus densidades, y que mientras mayor es ésta, más rápida es su difusión recíproca : el gas menos difusible es el más pesado.* Por ejemplo, el hidrógeno se difunde en dirección descendente unas cinco veces más de prisa que el ácido carbónico en la ascendente.

189. **Leyes de la mezcla de los gases.** — Estos hechos se encuentran expresados de manera general en las dos leyes siguientes.

1°. *Los gases entre que no existe acción química se mezclan con mayor ó menor rapidez de manera íntima y permanente.*

2°. Si la temperatura permanece constante, *la fuerza elástica final de la mezcla de varios gases es igual á la suma de las fuerzas elásticas que tendría cada uno de ellos si ocupara solo el volumen total.*

Demostración. — El experimento de Berthollet prueba estas dos leyes. Respecto de la primera, es evidente. Cuanto á la segunda, basta observar que, siendo H la presión inicial de cada gas dado el volumen v de un matraz únicamente, la presión final que cada uno de ellos ocuparía si llenara por sí solo la capacidad $2v$ de los dos

matraces, sería $\frac{H}{2}$: la suma de estas dos presiones es en efecto H, según Berthollet observó.

Fórmula general. — La segunda ley puede formularse de manera general. Sean v, v' v'' los volúmenes de tres masas de gases sin acción química unos sobre otros, f, f', f'' sus tensiones respectivas y V el volumen del vaso en que se les mezcla. El primer gas adquiere al pasar del volumen v al V, una tensión que, según la ley de Mariotte, es igual á $\frac{fv}{V}$. Análogamente la tensión del segundo gas se convierte en $\frac{f'v'}{V}$, y la del tercero $\frac{f''v''}{V}$. Representando por F la suma de estas tres fuerzas elásticas, se tiene

$$[1] \qquad F = \frac{fv + f'v' + f''v''}{V}.$$

Suprimiendo el denominador en la ecuación [1], ésta pasa á ser

$$[2] \qquad FV = fv + f'v' + f''v'' = \Sigma(fv)$$

En esta forma, que es la más cómoda para las aplicaciones del cálculo, la ley recuerda la de Mariotte, de que es consecuencia. Por lo demás, no se aplica á la mezcla de varios gases sino *en los límites de presión* en que la ley de Mariotte rige á cada uno de ellos.

Caso particular. — En el caso de que $f = f' = f''$ y en que $V = v + v' + v''$, se tiene

$$F = \frac{f(v + v' + v'')}{v + v' + v''} = .$$

es decir que la presión de la mezcla es la misma que la de los gases antes de mezclarse ; así ocurría en la experiencia de Berthollet.

190. **Disolución ó Absorción de los gases por los líquidos.** — El agua y algunos líquidos más tienen la propiedad de dejarse penetrar por los gases en proporciones más ó menos grandes : he ahí en qué consiste el fenómeno de la *disolución* [1].

Leyes. — Las leyes de la disolución de los gases en los líquidos (que no ejercen acción química sobre ellos) fueron descubiertas y enunciadas hace ya mucho tiempo por Henry (de Mánchester) y por Dalton; más adelante las comprobó y precisó Bunsen [2].

1° Ley de Henry. — *Cuando un gas se encuentra en contacto con un líquido que lo disuelve, se establece una relación constante, dada la misma temperatura, entre el volumen del gas disuelto, medido á la presión final de la atmósfera gaseosa, y el volumen disolvente.*

Coeficiente de solubilidad. — Esta relación constante (quiere decir, independiente de la presión final) para un mismo líquido y un mismo gas, se llama *coeficiente de absorción ó de solubilidad*, cuando se le calcula á la temperatura de 0°.

1. El mercurio parece negarse enteramente á la penetración de los gases : recuérdese que esta es una de las razones que lo han hecho preferir como líquido barométrico.

2. Y después por Kanikoff y Louguinine.

2° Ley de Dalton. — *Cuando una mezcla de varios gases está en contacto con un disolvente, cada uno de los gases se disuelve en ella como si ocupara solo el volumen de la mezcla.*

Cuanto á la presión final, relativa á cada uno de los gases, *es la presión que posee este gas en la mezcla gaseosa no disuelta.*

Consideremos por ejemplo el caso del aire atmosférico. El oxígeno no forma sino $\frac{1}{5}$ próximamente de un volumen; pues bien el agua absorbe en las condiciones ordinarias la misma cantidad de oxígeno que si la atmósfera toda se encontrara formada por este gas, bajo una presión igual á $\frac{1}{5}$ de la presión atmosférica.

191. **Estudio experimental de la solubilidad.** — 1°. *Método.* — Hay que considerar dos casos en el fenómeno de la disolución de los gases: aquel en que la atmósfera gaseosa no tiene límite, y entonces la presión final del gas disuelto es igual á la inicial; y aquel en que la atmósfera gaseosa es limitada, y entonces la presión final H es diferente de la presión inicial H_0.

El primer caso es el del aire atmosférico, que se disuelve en todos los líquidos existentes en la superficie de la tierra saturándolos con sus elementos gaseosos, en proporción de sus coeficientes de solubilidad y de la presión atmósferica del momento. El segundo caso es el único que se puede realizar por la experiencia y se le emplea para estudiar el fenómeno de la disolución.

Hay una relación sencilla entre H_0, H, V y U, volumen ocupado por el gas no disuelto. Se la deduce de la ley de Mariotte. En efecto, antes de la disolución la masa gaseosa ocupaba el volumen U á la presión inicial H_0; después de la disolución, ocupa el volumen U sobre el líquido, más el volumen cV dentro de éste, calculados ambos á la presión final H. Tiénese pues

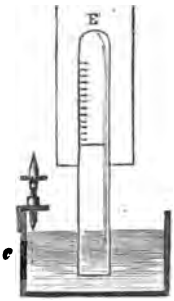


Fig. 195.

$$UH_0 = (U + cV)\,H.$$

Esta ecuación permite averiguar el valor de c en condiciones determinadas de temperatura y de presión. Tal es el principio del método que Bunsen usó con ayuda del *absorciómetro* (fig. 195).

2°. *Absorciómetro de Bunsen.* — Este aparato puede reducirse en sustancia á una probeta de gas graduada, dispuesta encima de una cuba de mercurio, de modo que se pueda introducir en ella, primero el gas que se trata de disolver, y luego el disolvente, y que se puedan calcular con precisión los volúmenes de ambos, así como las presiones al principio y al fin de la experiencia. La parte superior de la probeta está rodeada por un mango que se puede llenar de agua á temperatura determinada y constante. Aplicando la ecuación anterior, cuyos coeficientes todos pueden calcularse, se obtiene el valor de c en las circunstancias del momento.

3°. *Resultados.* — *a.* La experiencia prueba que la primera ley no puede considerarse como exacta más que en los gases poco solubles y hasta una presión de 3 atmósferas. Aun por debajo de este límite, no es aplicable á los gases de gran solubilidad, como el ácido sulfuroso, el ácido clorhídrico y el gas amoniaco; ni siquiera es rigurosa tratándose del ácido carbónico.

b. La ley de Dalton puede considerarse como exacta en los mismos límites que la primera.

c. El coeficiente de solubilidad disminuye cuando la temperatura sube, con arreglo á una ley que no es sencilla. Según Bunsen, cabe expresarla por una fórmula de tres miembros,

$$c = A - Bt - Ct^2,$$

en que A, B, C son constantes que varían con la naturaleza del gas. Dicho físico los determinó en gran número de casos.

d. El coeficiente del hidrógeno presenta la anomalía de ser sensiblemente independiente de la temperatura entre 0° y 20°.

CAPÍTULO V

APLICACIONES DE LA EXPANSIBILIDAD DE LOS GASES.

MÁQUINAS NEUMÁTICAS.

192. **Máquina neumática ordinaria.** — 1°. *Definiciones.* — Llámase *máquinas neumáticas* á unos aparatos que permiten *hacer el vacío* en

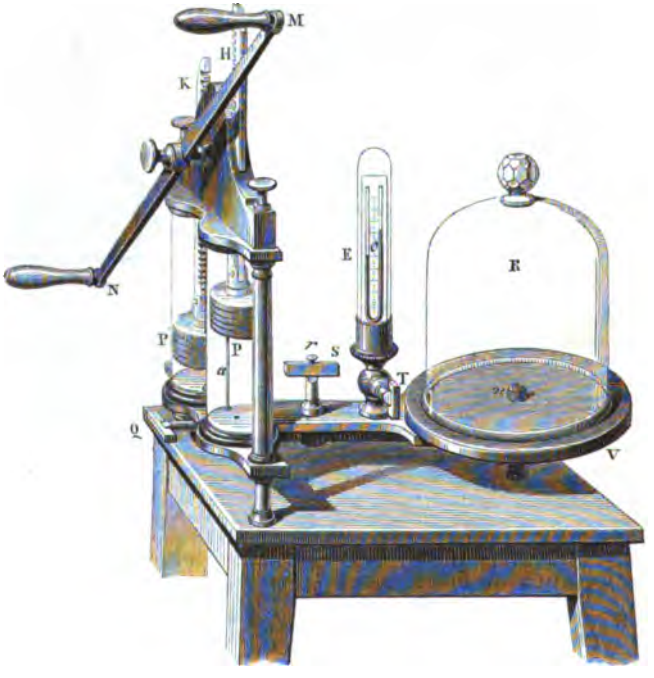


Fig. 196.

un espacio cerrado, ó más bien *enrarecer* el aire ó los gases allí contenidos, pues no es posible obtener el vacío absoluto. El más antiguo

de estos aparatos es el llamado *máquina neumática ordinaria*, que sigue siendo la clásica por excelencia.

2°. *Historia.* — La primera idea de la máquina ordinaria fué de Otón de Guericke, burgomaestre de Magdeburgo, que construyó en 1650 un modelo rudimentario, de un solo cuerpo de bomba, que le bastó no obstante para realizar su experiencia célebre de los *hemisferios de Magdeburgo*[1] (191).

3° *Descripción.* — a. *Plataforma, cuerpo de bomba, platina, recipiente.* — La máquina actual se compone de una gruesa plataforma de latón VGL (fig. 196 y 197), fija horizontalmente sobre una mesa. En una de sus extremidades se encuentran sólidamente fijos con mástic dos

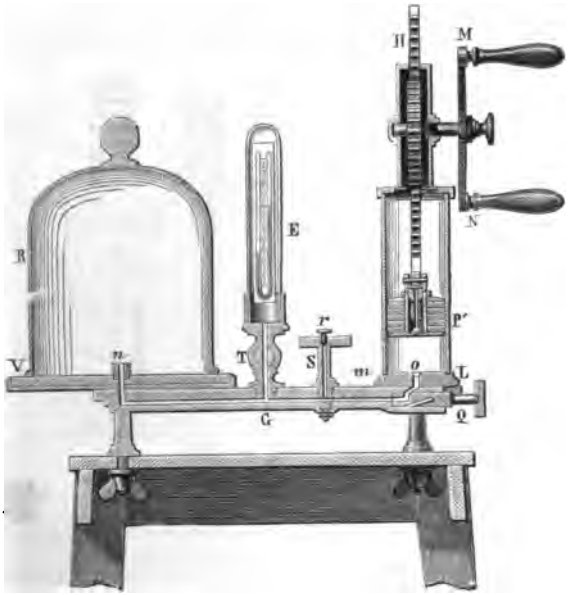


Fig. 197.

cilindros de cristal, en que se mueven dos émbolos de cuero P, P' : estos cilindros son los *cuerpos de bomba*. En el otro extremo presenta la plataforma un platillo ó *platina* V, en que está pegada con mastic una placa de vidrio sin pulimento y perfectamente plana. Ahí se pone el *recipiente* R, donde se trata de hacer el vacío[2]. En el centro de la platina hay un tubo de tuerca *n* en que se atornillan los matraces de vidrio con llaves ó los demás aparatos que se desea privar

1. Los principales perfeccionamientos introducidos en la construcción de esta máquina se deben a Boyle (1659), Papin (1685) y los últimos á Senguerd (en 1687) y á Smeaton (1751).

2. Papin fué quien reemplazó el primitivo globo de Otón de Guericke por esta cómoda disposición de una campana colocada sobre una platina.

de aire. La comunicación entre el recipiente y los cuerpos de bomba se establece por un conducto *nc* practicado en la plataforma (fig. 197, sección longitudinal de la máquina). Una vez que este conducto llega al cuerpo de bomba, se bifurca dirigiéndose á sus respectivas bases en *c* y *d* (fig. 200).

b. *Barras dentadas.* — Las barras que sostienen los émbolos, K y H, son dentadas y van á engranar con un piñón X (fig. 198). Dando vuelta á ese piñón alternativamente en sentidos contrarios, por medio de una manivela MN, se hace subir una de las barras dentadas mientras baja la otra, y se imprime á los émbolos[1] un movimiento de vaivén.

c. *Émbolos.* — Cada émbolo se compone (fig. 199, sección vertical) de dos discos de latón A y B, entre los cuales se encuentran redon-

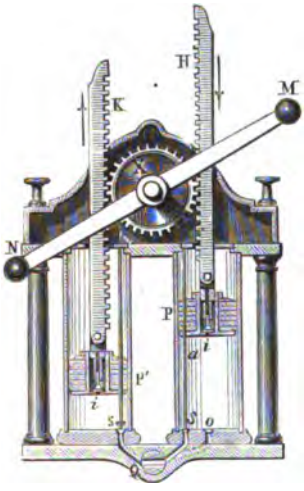


Fig. 198.

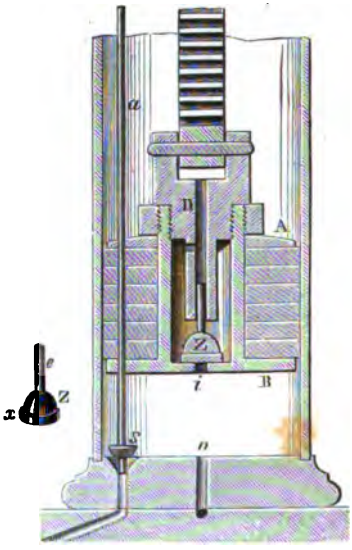


Fig. 199.

deles de cuero taladrados en su centro y empapados de aceite de pie de buey. El disco B está coronado por un conducto que atraviesa todos los redondeles, y en él hay un paso de tornillo donde se aprieta una tuerca que comprime fuertemente el disco A y los redondeles. Éstos, que son de diámetro algo mayor que los discos A y B, resbalan suavemente sobre las paredes del cuerpo de bomba, cerrándolas herméticamente. En lo interior del conducto central está atornillada una pieza D, en que se fija con un perno la barra dentada que hace

1. Á Boyle se debe la adaptación á cada vástago de los émbolos de esta cremallera que va á engranar con el piñón dentado.

mover el émbolo. La pieza D se encuentra atravesada en toda su altura por un conducto destinado á dejar que pase el aire desde la parte inferior del cuerpo de bomba á la superior y desde ahí á la atmósfera, (pues los cuerpos de bomba no están herméticamente cerrados en lo alto.) Finalmente, en el centro del disco B hay un agujero *i*, cerrado por una válvula metálica Z, que se abre de abajo arriba. Con esta válvula (representada á la izquierda de la figura 199) se une la varilla *e*, que penetra libremente en el conducto de la pieza D, disposición que tiene por objeto impedir que la válvula dé un vuelco cuando está levantada. En la parte inferior de la válvula hay un disco de corcho *x* que se aplica contra el orificio *i* cerrándolo.

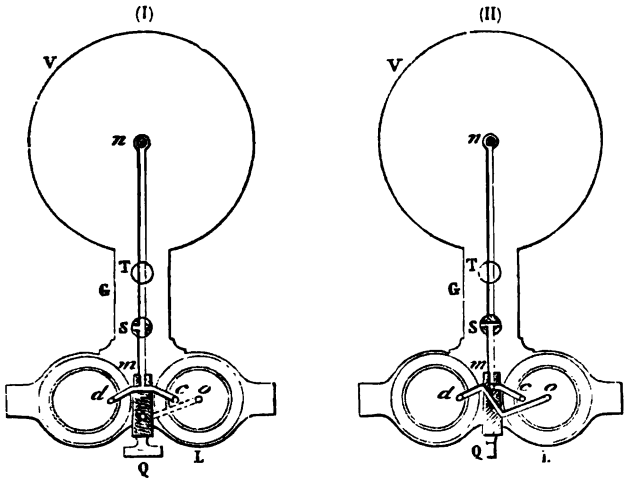


Fig. 200.

Además de la válvula Z situada dentro del émbolo, hay otra cónica *s* que sirve para cerrar en la base del cuerpo de bomba, el orificio *c* del conducto *cn* que se dirige al recipiente (fig. 197). Esta válvula se encuentra fija en la extremidad inferior de un vástago de hierro *a* (fig. 199), que atraviesa todo el émbolo, y se prolonga hasta lo alto del cuerpo de bomba. Como la varilla *a* resbala con rozamiento duro á través de los redondeles de cuero del émbolo, resulta que cuando éste baja, arrastra consigo la varilla de hierro y hace cerrar la válvula *s*; si sube, varilla y válvula se elevan, pero muy poco, porque esta varilla choca en seguida con la cara superior del cuerpo de bomba[1]. Á partir de este momento, se limita á resbalar en el émbolo, que sube solo.

1. Esta válvula de uncionamiento automático se debe á Papin. Reemplaza una llave que había que mover á mano después de cada golpe de émbolo en la máquina primitiva de Otón de Guericke.

d. *Llaves.* — La llave T sirve para poner en comunicación por el conducto *cn* al recipiente R con una probeta E, que describiremos pronto (6°). Cuanto á la llave S, establece ó interrumpe por el mismo conducto *cn* la comunicación entre el recipiente y los cuerpos de bomba. Cuando éstos funcionan, la llave S debe estar abierta (fig. 197 y 200, I), y entonces el aire del recipiente es aspirado; pero una vez que se hace el vacío en este último, como el aire tiende siempre á volver por los cuerpos de bomba, se da á la llave S un cuarto de vuelta (fig. 200, II) y el aire no puede penetrar ya en el recipiente sino filtrándose por entre sus bordes y la platina. Así es que esos bordes del recipiente ó campana deben ser tan horizontales que el contacto resulte perfecto; mas esto no basta y hay que untarlos con sebo. Dispuesta así la campana, *conserva el vacío* meses enteros.

La llave S está taladrada en el sentido de su eje por un conducto cuyo orificio se cierra herméticamente con un tapón metálico *r*. Hecho el vacío en la campana, basta retirar el tapón *r* [1] para que vuelva á entrar el aire en ella. La tercera llave Q, colocada entre los dos cuerpos de bomba, se destina á la operación del *doble agotamiento:* esa es la llave *de Babinet*, que pronto describiremos.

4°. *Funcionamiento.* — Supongamos primero que el émbolo P' (fig. 198 y 199) esté en la parte más baja de su carrera. En el instante en que empieza á ponerse en movimiento la manivela, este émbolo sube arrastrando consigo la varilla *a* y la válvula *s*, mientras que la válvula Z permanece cerrada por su propio peso y el de la atmósfera. La comunicación entre el cuerpo de bomba y la campana ó recipiente se obtiene por el levantamiento de la válvula *s* y parte del aire pasa al cuerpo de bomba. Cuando el émbolo baja, cambia el juego de las válvulas: la *s* se cierra y como el aire que está debajo del émbolo se encuentra cada vez más comprimido, acaba por levantar la válvula Z y salir á la atmósfera por el conducto D. La misma serie de fenómenos se reproduce al segundo golpe de émbolo y en los siguientes.

5°. *Límite del funcionamiento.* — Por bien hecha que esté una máquina neumática, no es posible evitar, debajo de los émbolos y en el contorno del disco inferior del émbolo, un *espacio nocivo*, donde se aloja pequeño residuo de aire. Por consiguiente, cuando el enrarecimiento es ya bastante grande, llega un momento en que el aire que está comprimido ahí no adquiere tensión suficiente para levantar la válvula: desde este instante, la máqnina no puede funcionar.

6°. *Probeta* y *barómetro truncado.* — Puede saberse en cada momento la fuerza elástica del aire que aun hay en la campana por medio de un pequeño manómetro de forma especial llamado *barómetro truncado*. Es una especie de barómetro de sifón cuya rama

1. La adición de esta llave para la entrada del aire se debe á Smeaton.

mayor tiene mucho menos de 76 centímetros de alto. Se le fija en una escala dividida en milímetros, y se le coloca debajo de una campana de cristal ó probeta E (fig. 196), que comunica con el recipiente por la llave T [1].

El aire del recipiente tiene por de pronto una fuerza elástica que equilibra y más todavía, el peso de la columna de mercurio existente en la rama cerrada, y ésta permanece llena; pero á medida que el fluido se enrarece, acaba por bajar el mercurio en la rama que primero ocupaba enteramente y, á partir de este instante, el instrumento funciona como manómetro: la diferencia de los niveles del mercurio en las dos ramas del sifón mide evidentemente la fuerza elástica del gas que queda en el recipiente y en los conductos de la máquina.

Si pudiera obtenerse vacío absoluto, los niveles quedarían necesariamente en el mismo plano horizontal; pero este caso no llega nunca, ni siquiera con las mejores máquinas.

7°. *Cálculo de los agotamientos sucesivos: ley del funcionamiento de la máquina.* — Hay que considerar dos casos: aquel en que no se tiene en cuenta el espacio nocivo, — caso puramente teórico, — y aquel en que se tiene en cuenta el espacio perjudicial.

Caso teórico. — Sean R la capacidad del recipiente y del tubo de aspiración, C la del cuerpo de bomba, H_0 la presión inicial en el recipiente. Antes del primer golpe de émbolo, la campana contiene cierta masa de aire cuyo volumen es R y la fuerza elástica H_0. Levántase el émbolo de uno de los cuerpos de bomba y esta masa de aire se difunde por el cilindro: su volumen pasa á ser R + C, y su presión H_1. Con arreglo á la ley de Mariotte, se tiene

$$H_1 (R + C) = H_0 R, \text{ de donde } H_1 = H_0 \frac{R}{R + C}.$$

Si ahora se baja el émbolo, la comunicación entre el cilindro y el recipiente queda rota en seguida, y el aire del recipiente conserva la presion H_1: *luego* H_1 *representa la fuerza elástica en el recipiente después del primer golpe de émbolo.* Se verá del mismo modo que la presión en el recipiente, después de dos golpes de émbolo, está dada por la fórmula

$$H_2 = H_1 \frac{R}{R + C} = H_0 \left(\frac{R}{R + C}\right)^2,$$

y, después de *n* golpes de émbolo, por la fórmula.

$$[1] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R + C}\right)^n.$$

Caso de un espacio perjudicial. — Sea *e* el espacio perjudicial. Observemos pri-

1. Este accesorio de la máquina fué ideado por Smeaton en 1751.

meramente que cuando se baja el émbolo en uno de los cilindros, el aire que se encuentra encerrado entre la base del émbolo y el fondo del cilindro se escapa, levantando la válvula, *hasta el momento en que su fuerza elástica se ha hecho igual á la presión exterior.* Al principio, cuando el émbolo está en la parte inferior de su curso, tenemos dos masas de aire : una que ocupa el volumen R del recipiente á la presión inicial H_0; el otro que ocupa el volumen del espacio perjudicial, á la presión atmosférica exterior H. Cuando se levanta el émbolo, estas dos masas de aire se mezclan en el volumen total (R + C) y adquieren una presión H_1, que está dada por la ecuación de la mezcla de los gases,

$$H_1 (R + C) = H_0 R + He;$$

de donde

$$[1] \qquad H_1 = H_0 \frac{R}{R+C} + H \frac{e}{R+C}.$$

Cuando se baja el émbolo, la comunicación queda inmediatamente interrumpida entre el cilindro y el recipiente, y éste permanece lleno de aire á la presión H_1 : *luego* H_1 *representa la presión del aire del recipiente después de un solo golpe de émbolo.* Se tendrá, análogamente, al cabo de dos golpes de émbolo,

$$[2] \qquad H_2 = H_1 \frac{R}{R+C} + H \frac{e}{R+C},$$

y así sucesivamente hasta el n^o golpe de émbolo,

$$[n] \qquad H_n = H_{n-1} \frac{R}{R+C} + H \frac{e}{R+C}.$$

De esta serie de ecuaciones se deduce el valor de H_n en función de H_0 : multiplícanse los dos miembros de la ecuación $(n-1)$ por $\frac{R}{R+C}$, y después los dos miembros de la ecuación $(n-2)$ por $\left(\frac{R}{R+C}\right)^2$, y así sucesivamente hasta la ecuación [2] cuyos dos miembros se multiplican por $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2}$, y la ecuación [1], cuyos dos miembros se multiplican por $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1}$.

Sumando estas ecuaciones transformadas miembro á miembro, se hacen desaparecer los términos intermedios en la suma, y queda

$$H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H \frac{e}{R+C}\left[\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1} + \left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2} + \dots + \frac{R}{R+C} + 1\right].$$

Efectuando la suma de la progresión geométrica creciente contenida entre paréntesis, y suprimiendo en el segundo término el factor común (RH), se tendrá

$$[2] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H \frac{e}{C}\left[1 - \left(\frac{R}{R+C}\right)^n\right].$$

193. **Límite del vacío.** — Si nos atuviéramos á la fórmula simplificada

$$[1] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n,$$

no habría límite del vacío, en el sentido de que podríamos acercarnos al *vacío absoluto* tanto como se quisiera, puesto que H_n es tanto más pequeño cuanto mayor es el número n de los golpes de émbolo.

Pero la fórmula [2], que tiene en cuenta el espacio perjudicial, es

la única conforme á la realidad práctica, y por tanto la sola aceptable. Ahora bien, si se hace $n = \infty$, resulta en ella

$$H_n = H \frac{e}{C} = \lambda.$$

λ representa por tanto la presión más escasa que se puede alcanzar al cabo de un número infinito de golpes de émbolo; ese es propiamente hablando el *límite* del vacío.

2°. *Demostración directa de la fórmula.* — Es posible encontrar esta fórmula sin pasar por la ley general de los agotamientos. Hemos visto, en efecto, que cuando se baja el émbolo, el aire encerrado en el cuerpo de bomba levanta la válvula de aquél y sale, mientras existe presión superior ó igual á la exterior. Por tanto, si se ha alcanzado el límite, es decir, si la válvula llega á no funcionar, es porque la masa de aire que se difunde por el cilindro cuando el émbolo está en lo alto de su carrera, tiene presión λ que se elevaba todo lo más al valor H, cuando la masa de aire se reducía al volumen e del espacio perjudicial. Aplicando la ley de Mariotte, se tiene

$$He = C\lambda, \quad \text{de donde} \quad \lambda = H\frac{e}{C}.$$

Ahora bien, cuando el émbolo está en lo alto de su carrera, hay comunicación entre el cilindro y la campana ó recipiente: luego λ representa también la presión límite del aire en éste.

3°. *Límite práctico.* — En la práctica ni siquiera es posible alcanzar este límite. Las mejores máquinas neumáticas de este modelo no pueden disminuir la presión más de 1 ó 2 milímetros. Esto depende de que, además del espacio perjudicial, que hemos tenido en cuenta, existen enlaces y junturas numerosos más ó menos perfectos. La cantidad de gas expulsada es al principio mucho mayor de la que penetra por esas junturas; pero llega un momento en que ambas acciones se compensan; entonces se ha alcanzado el límite práctico del vacío y el vaivén de los émbolos sólo sirve para mantener constante la presión final.

194. **Llave de Babinet ó llave de doble agotamiento.** — Babinet agregó á la máquina ordinaria una disposición especial que permite llevar el enrarecimiento del aire mucho más lejos de lo que consiente el límite normal del vacío.

1°. *Descripción.* — Es una llave Q, colocada en la bifurcación del canal que conduce el aire del recipiente á los dos cuerpos de bomba : está taladrada en su masa por varios conductos que se utilizan sucesivamente, dándole vuelta en dos posiciones rectangulares. Las figuras 201 (I y II) representan su sección vertical en estas dos posiciones. Las figuras 200 (I y II) indican la sección horizontal de las comunicaciones entre la llave y los cuerpos de bomba que corresponden á estas dos posiciones.

En la posición (I), la llave establece, por un conducto central y dos laterales, la comunicación entre el recipiente y los cuerpos de bomba, de n á c y d, y la máquina funciona entonces según antes se ha dicho. Cuando deja de funcionar

esto es, cuando las válvulas Z han dejado de abrirse, se da vuelta á la llave Q 90 grados y entonces queda en la posición (II). Á partir de este momento, los demás conductos de la llave corresponden á los de la plataforma, y el cuerpo de bomba de la derecha *es el único* que comunica con el recipiente por el conducto *nmc*, mientras que el de la izquierda queda relacionado, por un conducto que atraviesa oblicuamente la llave, con una abertura central *o*, practicada en la base del cuerpo de bomba de la derecha, y siempre abierta.

2°. *Funcionamiento.* — Cuando entonces se levanta el émbolo de la derecha, se aspira el aire de la campana; pero al bajarlo, el aire que acaba de ser aspirado es impulsado hacia el cuerpo de bomba de la izquierda pasando por los orificios *o* y *d* (fig. 200); este último se abre, pues la superficie cónica que le corresponde se levanta. Cuando más tarde sube el émbolo de la derecha, baja el de la izquierda; pero el aire que comprime al descender no vuelve al cuerpo de bomba

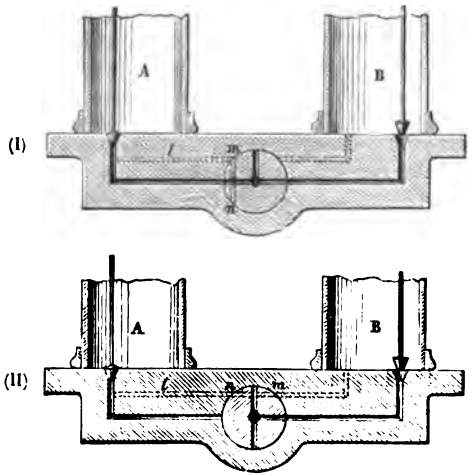


Fig. 201.

de la derecha, porque el orificio *d* es cerrado ahora por la válvula cónica. Si el émbolo de la derecha continúa de este modo aspirando el aire del recipiente é impulsándolo al cuerpo de bomba de la izquierda, el fluido se acumula aquí y acaba por adquirir tensión suficiente para levantar la válvula Z del émbolo, lo que era imposible antes de que se diera vuelta á la llave Q. Compréndese, por tanto, que la máquina, ya inerte en la posición (I) de la llave, funciona de nuevo en la posición (II).

3°. *Teoría.* — En la posición (II) sólo uno de los cilindros, por ejemplo B, comunica con el recipiente y hace el vacío en él, mientras que el otro cilindro A comunica con el primero, y saca de ahí el aire procedente de la campana (fig. 201). Cuando el émbolo deje de funcionar de nuevo en el cilindro A se habrá alcanzado evidentemente *un nuevo límite del vacío.* Supongamos que se ha llegado á él: desde este momento, el aire comprimido en el espacio perjudicial e_1, adquiere allí presión igual todo lo más á la presión exterior H. Por esto no vuelve á levantarse la válvula del émbolo. Sea λ la presión que tenía esta misma masa de aire cuando el mismo émbolo se hallaba en lo alto de su carrera; λ está relacionado con la presión H por la ley de Mariotte. En efecto, llamando C_1 la capacidad del cilindro A, tenemos

$$\lambda C_1 = e_1 H, \quad \text{de donde} \quad \lambda = H \times \frac{e_1}{C_1}.$$

Ahora bien, cuando el émbolo del cilindro A está en lo alto de su camino, el otro se halla en lo más bajo del cilindro B, y el espacio perjudicial de éste comunica libremente, por medio de la llave de Babinet, con el cilindro A; luego la presión es igualmente λ para la masa de aire confinada en el espacio perjudicial de B. Sea λ_1 la presión que tenía esta misma masa de aire cuando el émbolo se hallaba en lo alto de su carrera. Resulta análogamente, llamando C la capacidad del cilindro B,

$$\lambda e = \lambda_1 C, \qquad \text{de donde} \qquad \lambda_1 = \lambda \frac{e}{C} = H \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1}. \qquad [1$$

Finalmente, cuando el cuerpo de bomba B comunicaba libremente con la campana, el aire que quedaba en ésta tenía la misma presión que en B; luego λ_1 representa la presión límite final en la campana, es decir, el *nuevo límite del vacío*.

4.° *Nueva fórmula del vacío.* — Si se supone $e_1 = e$ y $C_1 = C$, lo que equivale á considerar la máquina como perfectamente simétrica, y como despreciables las capacidades de los conductos de la masa metálica, la fórmula pasa á ser

$$[2] \qquad \lambda_1 = H \left(\frac{e}{C}\right)^2.$$

La fracción que representa el nuevo límite del vacío es, pues, el cuadrado de la que representaba el primero. Por esto se expresa en algunas ocasiones el efecto de la llave de Babinet diciendo que sirve para hacer *el vacío del vacío*.

Observación. — En el cálculo precedente hemos despreciado el esfuerzo necesario para levantar el peso del émbolo y anular la resistencia de la válvula. Si se tuviera esto en cuenta, habría que añadirlo á la presión exterior H. Entonces se tendría, llamando ι á la suma de estas dos presiones adicionales.

$$[1] \qquad \lambda = (H + \iota) \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1}$$

y

$$[2] \qquad \lambda_1 = (H + \iota) \left(\frac{e}{C}\right)^2.$$

195. Usos de la máquina neumática. Experiencias clásicas. — Ya hemos descrito multitud de experiencias que se hacen utilizando la máquina neumática. Tales son las del *tubo de Newton* (44), del *martillo de agua* (44), de la *vejiga en el vacío* (140), del *rompe-vejigas* (142), de los *hemisferios de Magdeburgo* (142), y del *baróscopo* (160). Es posible citar otras, clásicas también, por ejemplo la de *la fuente en el vacío* y la de la *lluvia de mercurio*.

Fig. 202.

Fuente en el vacío. — Se toma un matraz de vidrio A (fig. 202), muy prolongado y provisto en su base de un gollete de llave, con un conducto que penetra en su interior. Habiendo atornillado este globo en la platina de la máquina neumática, se hace el vacío, se cierra la llave y después se lleva el aparato á un vaso R

lleno de agua. Si entonces se abre la llave, la presión atmosférica que se ejerce sobre el líquido la hace saltar por el conducto, lo mismo que el agua de una fuente.

Lluvia de mercurio. — Esta experiencia demuestra la permeabilidad de ciertas sustancias poco porosas en apariencia, tales como la piel

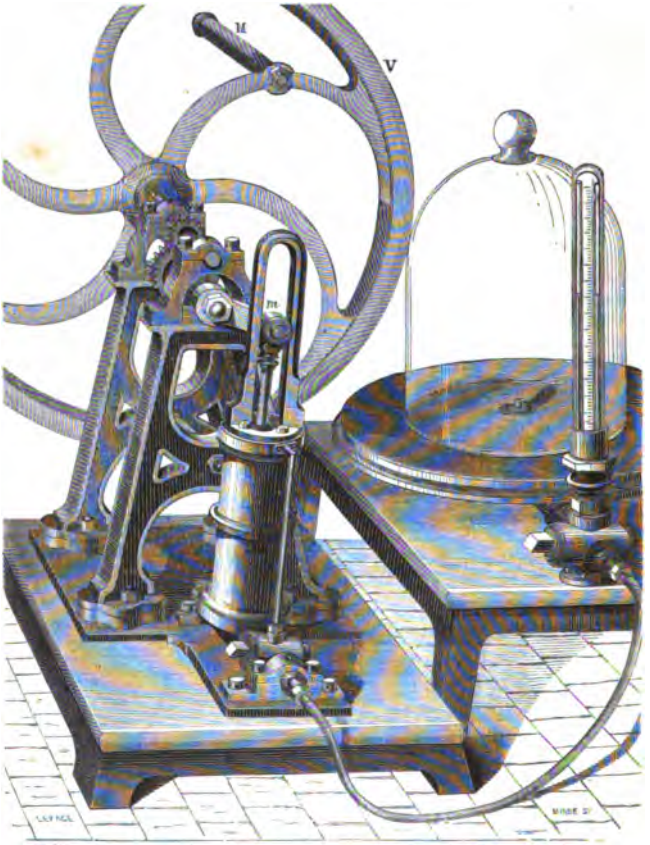


Fig. 203.

de gamuza, el cuero grueso, la madera cortada perpendicularmente á las fibras: hácese con una de estas sustancias un disco ó redondel que forma el fondo de un cubilete de cobre, que se prolonga en un largo tubo para hacer el vacío, análogo al de Newton. Lleno el cubilete de mercurio, se hace el vacío por debajo del fondo, en el tubo prolongación. Entonces ocurre que la presión atmosférica, al

ejercerse sobre el líquido, le hace atravesar la membrana, y caer por el tubo en forma de lluvia mercurial.

196. **Máquina neumática de Bianchi.** — Bianchi imaginó una máquina neumática que presenta varias ventajas sobre la ordinaria. Es de manejo mucho más cómodo, porque el movimiento de vaivén del émbolo se debe á la rotación de un volante de manubrio. De esta manera el funcionamiento del émbolo es más fácil y rápido. Y como se pueden dar al cilindro dimensiones considerables, resulta que esta máquina puede hacer un vacío tan completo como el que hace la ordinaria, y esto en vasos mayores y en menos tiempo.

Descripción. — La máquina entera es de fundición y sólo tiene un cilindro que puede oscilar sobre un eje horizontal fijo en su base (fig. 203). En una armadura de fundición se monta un árbol horizontal, con un volante muy pesado V, á que se da vuelta por medio del manubrio M. En este mismo árbol se fija una biela *m* que se articula en la cabeza del vástago del émbolo. Por consiguiente, á cada revolución completa del volante efectúa el cilindro dos oscilaciones sobre su eje.

Por lo demás, aunque la máquina no tiene más que un cuerpo de bomba, es de *doble efecto*, quiere decir que el émbolo hace el vacío cuando sube y cuando baja. Esto se debe á la forma especial del émbolo, que contiene primeramente una válvula *b* (fig. 204), que puede abrirse de abajo arriba, como en la máquina ordinaria; pero además, su vástago AA es hueco, y da paso á un tubo de cobre rojo V, por donde se escapa el aire que sale del orificio *b*. En la base superior del cilindro mismo se encuentra alojada una segunda válvula *a*, que se abre también de abajo arriba. Por fin, un vástago de hierro D atraviesa el émbolo rozándolo con fuerza, y termina en sus dos extremos en dos tapones cónicos *s* y *s'* que pueden cerrar alternativamente los dos orificios paralelos de un tubo de aspiración BC de dos ramas.

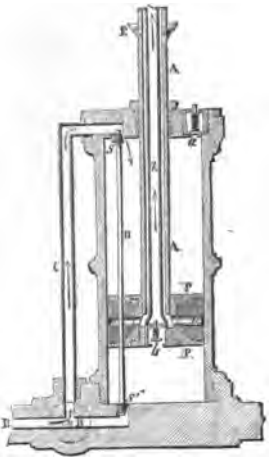


Fig. 204.

Funcionamiento. — Supongamos que el émbolo baje. La válvula *s'* se cierra entonces y, como la *s* está abierta, el aire de la campana va á ponerse encima del émbolo, mientras que debajo el aire comprimido por éste levanta la válvula *b* y se desprende por el tubo X. Cuando el émbolo vuelve á subir, la aspiración se efectúa por *s'* y como la válvula *b* está cerrada, el aire comprimido sale por la válvula *a*. Se comprende pués sin dificultad por qué es de doble efecto la máquina, aunque sólo tiene un cilindro : las dos partes, inferior y superior, separadas por el émbolo, funcionan alternativamente como los dos cilindros de una máquina ordinaria.

Llave de doble agotamiento. — Se comprende del mismo modo que sea también posible adaptar á la máquina una llave de doble agotamiento R, parecida á la de Babinet. Esta llave se encuentra en R (fig. 204) en el punto de reunión de las dos ramas del tubo de aspiración. Dándole vuelta convenientemente, se puede establecer en un momento dado la misma relación entre las dos porciones del cilindro único que entre los dos cilindros de la máquina ordinaria.

Modo particular de darle aceite. — Una de las principales razones del buen funcionamiento de esta máquina es que se le da aceite de manera particular : una pequeña cápsula E (fig. 204), fija en el vástago, está llena de dicho líquido, que va cayendo en el espacio anular comprendido entre el vástago AA' y el tubo X; desde ahí se dirige á un conducto *oo*, practicado en la masa del émbolo, y la

presión atmosférica, que le empuja, le hace distribuirse de manera permanente sobre el contorno del émbolo.

197. **Máquina neumática de Deleuil.** — *Principio.* — Es también una máquina rotatoria, de un solo cuerpo de bomba y de doble efecto como la anterior; pero presenta el carácter particular de que su émbolo resbala sin frotamiento y sin adición de aceite á lo largo del cilindro, cuyas paredes no toca. La construcción de esta curiosa máquina se funda en el hecho de que *los gases circulan muy difícilmente á través de los conductos capilares, sobre todo si éstos se encuentran provistos de dilataciones y depresiones alternas.* Con esta máquina se puede obtener bastante de prisa un vacío de 2 á 3 milímetros en un recipiente ó campana de 13 á 14 litros.

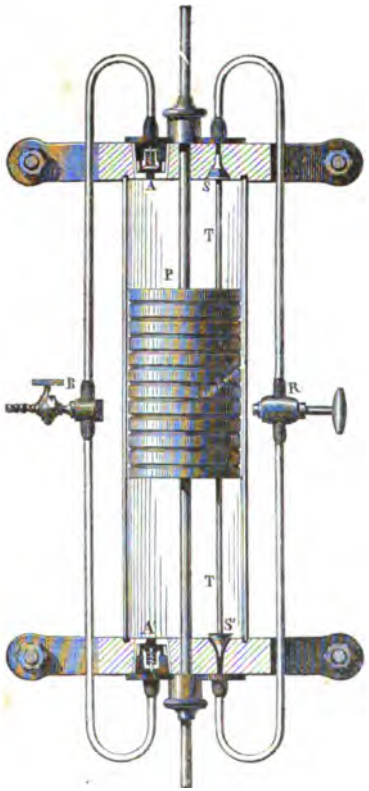


Fig. 205.

Descripción. — El émbolo es un largo cilindro metálico macizo P (fig. 205), cuya superficie está surcada de ranuras horizontales. Como su diámetro es inferior al del cilindro (en $\frac{1}{50}$ de milímetro próximamente), puede deslizarse á lo largo de éste sin taparlo por completo; pero el cojinete de aire que se aloja en las ranuras forma una especie de mampara compresible que basta para separar los gases en las dos divisiones del cilindro.

El movimiento se transmite al émbolo por un vástago metálico que atraviesa los dos fondos del cilindro. La campana comunica alternativamente con cada división de éste por mediación de un doble tubo encorvado, cuyos extremos desembocan en S y S'. Los orificios son cerrados sucesivamente por dos tapones cónicos que sostiene la varilla TT, que atraviesa el émbolo rozando con él y es arrastrada en su movimiento. Por fin, dos aberturas de válvula A, A' ponen á cada compartimiento en relación con la atmósfera, por medio de un doble tubo abductor cuyas extremidades se reunen en R.

El cilindro no es *oscilante*, como el de Bianchi, sino *fijo*: ha habido, pues, necesidad de utilizar una disposición especial para comunicar al émbolo, mediante la rotación del volante, un movimiento rectilíneo alterno. M. Deleuil ha obtenido esta transformación de movimientos mediante un *engranaje de la lire.*

198. **Bomba neumática de E. Carré.** — Esta es una máquina neumática de un solo

cuerpo de bomba y de simple efecto, que tiene tres caracteres especiales : 1°. realizar desde luego el vacío que se obtiene de ordinario con ayuda de la llave de Babinet; 2°. carecer de espacio perjudicial; 3°. suministrar un *vacío seco*.

Descripción. — El cilindro es dividido por el émbolo en dos compartimientos de dimensión diversa. Al inferior llega el aire del recipiente cuando el émbolo se encuentra en lo alto de su camino. Desde que éste baja, el aire es comprimido y levanta una primera válvula, que se encuentra en la base del émbolo, pasando á través de éste, al compartimiento superior. Cuando el émbolo vuelve á subir, la válvula se cierra, el aire que está encima de aquél es comprimido, levanta otra válvula y se pierde en la atmósfera. Se ve pues que el compartimiento superior hace el vacío en el inferior, y que éste es el único que comunica con el recipiente.

Además, no hay espacio perjudicial porque las dos válvulas sobresalen un

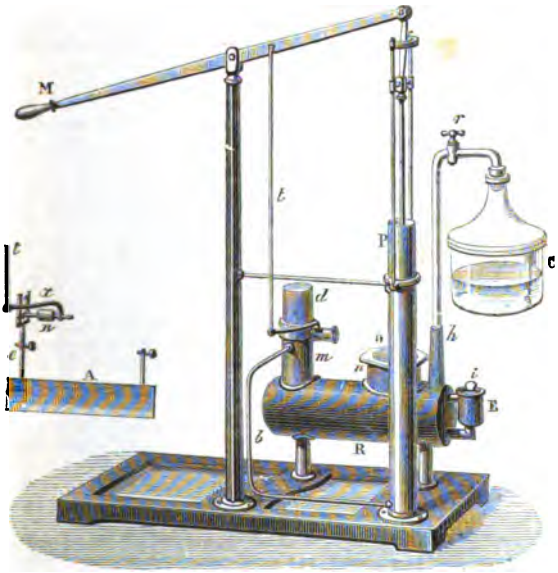


Fig. 206.

tanto por encima de sus orificios respectivos y son levantadas necesariamente por la presión del émbolo contra las bases del cilindro (fig. 206).

El émbolo se fija en la extremidad de una varilla rígida, que se pone en movimiento con ayuda de un balancín de puño. El aire del recipiente es aspirado por medio de un tubo *hr*, pasa á un vaso R, encima de un baño de ácido sulfúrico, cuya superficie se renueva constantemente por medio de un agitador *e* A, que también es puesto en movimiento por el balancín. De esta manera se logra absorber todo el vapor de agua del gas enrarecido, y se obtiene rápidamente un vacío seco de medio milímetro.

Observación. — Esta máquina se llama con frecuencia *congelador*, por causa de su aplicación especial, que consiste en producir la congelación de agua en grande por ebullición en el vacío seco; pero puede reemplazar en todas las circunstancias y con mucha ventaja á la máquina neumática ordinaria de doble efecto. Basta con sustituir la botella de agua ordinariamente adaptada al orificio del tubo de aspiración, por una platina ordinaria de máquina neumática.

MÁQUINAS NEUMÁTICAS DE MERCURIO.

199. **Principio y generalidades.** — El principio de las máquinas de mercurio consiste en repetir cómoda é indefinidamente la experiencia de Torricelli con un recipiente ó campana de gas, de modo que ésta se transforme en una especie de cámara barométrica : de este modo se realiza en el recipiente una especie de *vacío barométrico* mucho más perfecto que el de las mejores máquinas de émbolo. Además, gracias al empleo de una columna de mercurio como émbolo, el espacio perjudicial queda suprimido enteramente. Tomando ciertas precauciones que indicaremos más adelante, se llega con seguridad á obtener los dos niveles del mercurio en el manómetro de la máquina, á no observar diferencia apreciable ninguna.

La idea de esta máquina se debe á Regnault; el primer modelo práctico que se ejecutó fué hecho por el constructor Geissler de Berlín (en 1857). Pero el aparato alcanzó su perfección gracias á los trabajos de los hermanos Alvergniat, constructores de París. Existe otra máquina de mercurio, la de M. Jamin, construída según un tipo completamente distinto del de Geissler.

200. **Máquina de Alvergniat** (modelo primitivo). — 1°. *Descripción.* — Este aparato, construído casi todo de vidrio, se compone de dos depósitos A y B (fig. 207, I y II) unidos entre sí por un tubo barométrico T y por otro de caucho C. El depósito B y el tubo T se encuentran fijos en una tableta vertical; el depósito A, que es libre y está abierto, sube y baja alternativamente en una distancia de 1, 12 m. Este movimiento se produce por medio de una larga cinta de hilo que, atada por una punta al depósito A, pasa por una polea *a*, yendo luego á arrollarse en otra polea *b*, que se hace girar con un manubrio. Encima del depósito B se encuentra una llave de tres conductos *n*, de donde sale un tubo *d* que sirve para la aspiración, y en la izquierda está una llave simple *m*, que establece la comunicación con un depósito de mercurio *v* y con la atmósfera. El tubo de aspiración *d* no está directamente en comunicación con el recipiente en que va á hacerse el vacío; sino que primero se dirige á un depósito *o*, lleno en parte de ácido sulfúrico destinado á secar los gases que llegan al aparato. Por fin, un tubo de caucho *e* establece la comunicación con el recipiente. El depósito *o* está provisto de un pequeño manómetro de mercurio *p*.

2°. *Funcionamiento.* — Hallándose el depósito A en lo alto de su camino (fig. 207, I) abierta la llave *m* y colocada la llave *n* según vemos en Z, el tubo de caucho C, el tubo T, el depósito B y el tubo que está encima se llenan de mercurio hasta *v* (fig. 207, I). Si entonces se cierra la llave *m* (fig. 207, Y), y se baja el depósito A (fig. 207, II), el mercurio baja en el depósito B y en el tubo T hasta que la diferencia de nivel en ambas ramas sea igual á la altura barométrica, y en el depósito B se hace el vacío. Entonces se da vuelta á la llave *n* (fig. 207, X), el gas del recipiente donde se hace el vacío llega por los tubos *c* y *d* á la cámara barométrica B, y el nivel baja de nuevo en el tubo T. Vuélvense á colocar ahora las llaves en la posición inicial (fig. 207, Z) y se sube otra vez el depósito A; el exceso de presión del mercurio que se encuentra en el tubo de caucho expulsa por las llaves *n* y *m* el gas que había penetrado en la cámara B, y si con él son arrastradas algunas gotecillas de mercurio, se las recoge en el vaso *v*. Esta operación se repite hasta que el mercurio del manómetro quede sensiblemente al mismo nivel en ambas ramas.

Precauciones que deben tomarse en la maniobra. — Esta máquina permite llevar el vacío hasta $\frac{1}{10}$ de milímetro, con tal de que el mercurio esté bien seco. Pero como su acción es muy lenta, sería largo y fastidioso manejarla en el caso de recipientes algo grandes. Así es que no se las emplea más que para hacer el vacío en espacios pequeños. Cuando se trata de vasos grandes, empiézase por hacer en ellos el vacío con aproximación de un centímetro en las máquinas ordinarias, y después se acaba con la de mercurio. Para hacer el vacío de esta manera en tubos grandes, que tienen hasta 10 litros de capacidad, se necesitan varias horas; hácese andar la máquina con intermitencias de 15 á 20 minutos, sobre todo al fin de la operación.

201. **Máquina de Alvergniat** (nuevos modelos). — En las máquinas que construye actualmente M. Alvergniat, el movimiento de ascensión y de descenso del depósito A no se obtiene por medio del sistema de cintas y poleas precedentemente

descrito, sino con una *cadena de Galle* que se ata por una parte al depósito y que por otra (fig. 215) va á arrollarse en una pequeña rueda dentada que es el último término de una serie de engranajes. Pónese el sistema en movimiento actuando sobre el manubrio de un volante, de modo que el depósito suba ó baje á volun-

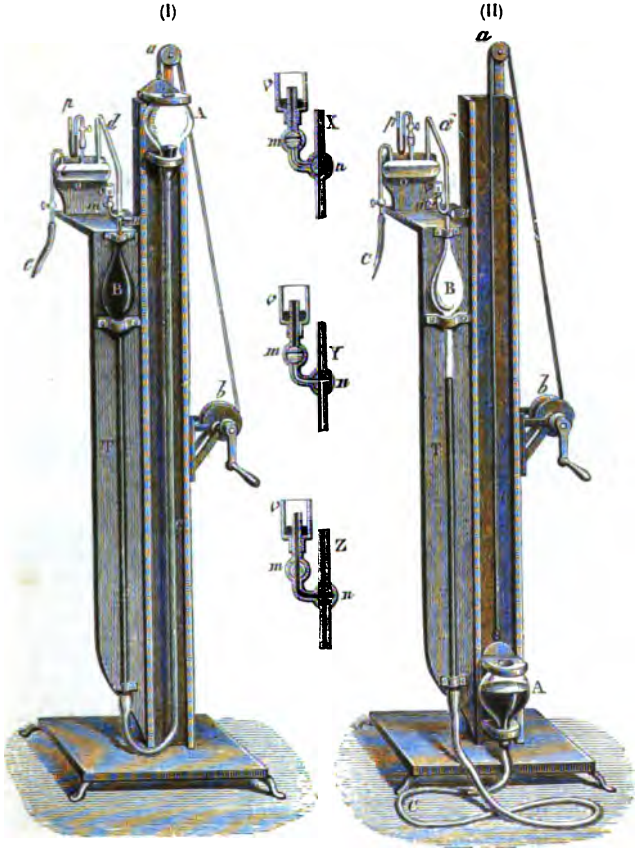


Fig. 207.

tad : hay que tener la precaución de levantar previamente un calzo que sirve para detener todo el sistema. En cuanto á las demás piezas, son poco más ó menos las mismas.

Máquina sin llaves. — Hace algún tiempo que M. Alvergniat construye máquinas completamente desprovistas de llaves y que funcionan automáticamente gracias al movimiento de balance vertical del depósito.

CAPÍTULO VI

APLICACIONES DE LA ELASTICIDAD DE LOS GASES.

—

BOMBAS DE COMPRESIÓN. — TROMPAS ASPIRANTES É INSUFLANTES. APLICACIONES DEL AIRE COMPRIMIDO.

202. **Máquina de compresión.** — Así como es posible enrarecer todos los gases en una campana ó recipiente gracias á su expansibilidad, así también es posible comprimirlos en virtud de su compresibilidad. Después se puede utilizar esta masa gaseosa comprimida, que apenas tenga una salida, se dilatará, gracias á su elasticidad, como un resorte metálico.

La compresión del aire y de los gases se efectúa por medio de instrumentos especiales, llamados *máquinas* ó *bombas de compresión.*

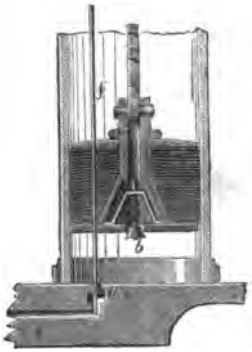


Fig. 208.

Máquinas de dos cuerpos de bomba. Una máquina neumática ordinaria, en que el juego de las válvulas estuviera invertido, podría servir de máquina de compresión. Mientras que en la máquina neumática las válvulas se abren de abajo arriba, aquí se abrirían de arriba abajo (fig. 208). Esta forma de máquina de dos cuerpos de bomba fué construida antaño y se encuentra todavía en los gabinetes viejos de física; pero como es al mismo tiempo incómoda, voluminosa y poco sólida, se la ha abandonado completamente, reemplazándola por las máquinas de un solo cilindro y de simple efecto, que se denominan *bombas de compresión.*

203. **Bomba de mano.** — Es la más sencilla y cómoda de las bombas de compresión; puede tener una de las dos formas indicadas en las figuras 209 y 210.

Descripción. — La *bomba de mano* se compone de un cuerpo de bomba A de pequeño diámetro (fig. 209) donde se mueve á mano por medio de un mango, un émbolo macizo, esto es, sin válvula. El cuerpo de bomba está provisto en su base de dos golletes horizontales de llave; en estos golletes se encuentran dos válvulas *o* y *s*, que actúan en sentidos contrarios, para servir, la primera en el momento de aspirar y la segunda en el de dar impulso. Unos pequeños muelles cilíndricos mantienen las válvulas cerradas.

Colócanse llaves de tres conductos en B y C, unidas á los golletes laterales del cilindro; esto permite restablecer como se quiera la

presión atmosférica sea en la bomba sola, sea en la campana sola, sea en ambas al mismo tiempo.

Utilización de las bombas de compresión como máquinas neumáticas.

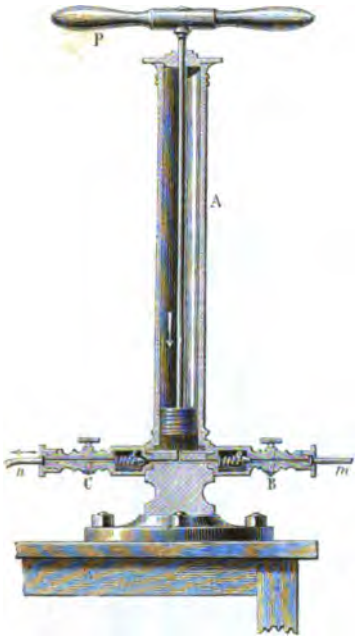


Fig. 209.

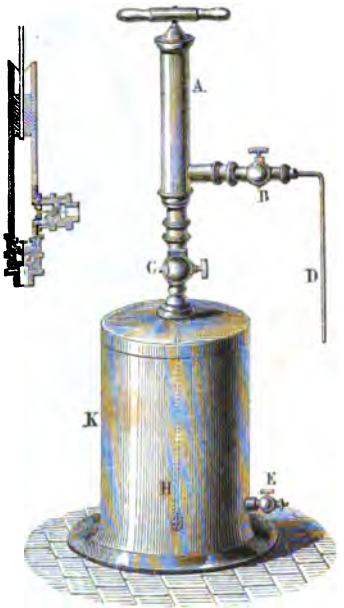


Fig. 210.

— Estas bombas pueden servir también para hacer el vacío. Con tal fin se hace que el gollete *m* comunique con el recipiente de donde se quiere extraer el aire y la *n* con la atmósfera.

204. **Máquina de compresión de Regnault.** — Regnault se sirvió en sus experimentos sobre la ley de Mariotte de una máquina de compresión bastante poderosa para dar al gas del depósito una presión de 30 atmósferas.

Descripción. — Esta máquina se encuentra constituída por la reunión de tres bombas de mano perfeccionadas, que llaman bombas Silbermann (fig. 211). Los vástagos de los tres émbolos están articulados, por medio de tres *bielas*, con tres porciones acodilladas de un mismo eje; éste se encuentra provisto de un volante y es puesto en movimiento por uno ó dos manubrios. Todos los conductos de aspiración por una parte y por otra todos los de compresión van á desembocar en unos depósitos esféricos, que están en comunicación directa, uno con el gasómetro de donde se toma el gas, y el otro con

el recipiente en que se le comprime. Este aparato tiene el aspecto de una máquina industrial y se halla sólidamente sujeto al suelo con pernos, de modo que en caso necesario pueda ponerlo en acción un motor. La figura 212 hace ver la disposición de las válvulas en una de las bombas reunidas y da á conocer su funcionamiento.

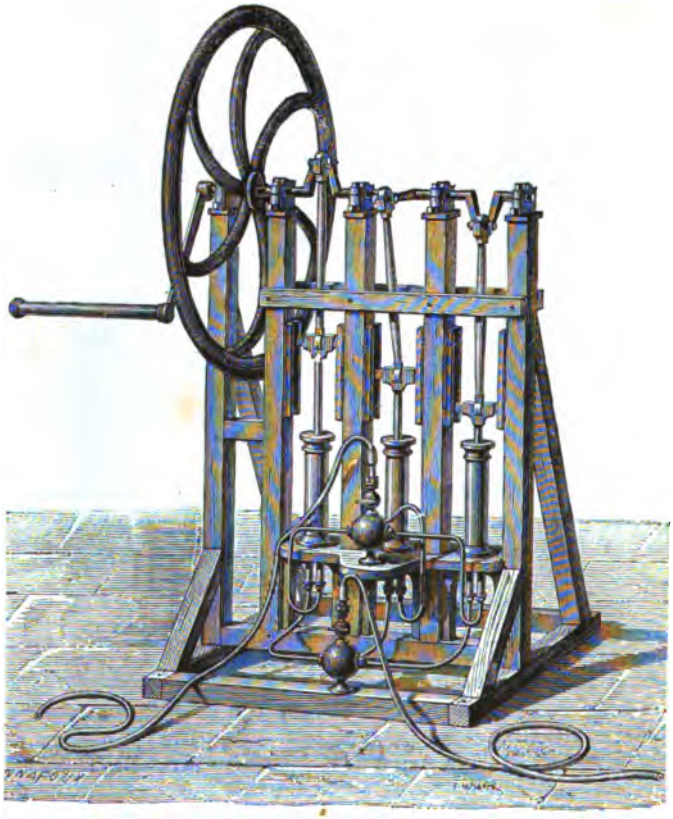


Fig. 211.

Observación. — Según ya se ha visto, la compresión de los gases viene acompañada por desprendimiento de calor más ó menos considerable. Este es un obstáculo serio al funcionamiento de estas máquinas. El calor que se desprende altera los diversos órganos y tuerce los émbolos. Atenúanse tales inconvenientes en algunas máquinas industriales sumergiendo las válvulas inferiores en un depósito de agua á una temperatura constante. De esta manera se llega á comprimir el aire, sin inconvenientes, hasta más de 50 atmósferas.

205. **Bomba Cailletet.** — Cailletet logró suprimir al mismo tiempo el inconveniente de la calefacción y el del espacio perjudicial en una bomba de compresión *de émbolo mercurial*, que construyó expresamente para sus experimentos sobre la liquefacción de los gases.

La originalidad de este aparato consiste en la disposición del émbolo. El cuerpo de bomba y el émbolo están invertidos; debajo de este último se encuentra una capa de mercurio, de manera que á cada golpe del émbolo dicho líquido va á llenar completamente el fondo del cuerpo de bomba (suprimiendo de este modo todo espacio perjudicial) y á levantar la válvula que establece la comunicación con el recipiente (esta válvula, que es de ebonita, no puede alterarse por la acción del mercurio). Cuanto á la válvula de aspiración, fué suprimida. Cailletet la reemplazó por una llave que se abre y se cierra en el momento conveniente por medio de un sistema de engranajes. En fin, el movimiento del émbolo se obtiene mecánicamente por medio del movimiento rotatorio del émbolo.

Esta bomba sirve para comprimir masas de gas considerables bajo presiones de varios centenares de atmósferas. Cailletet redujo con ella á líquido primeramente el ácido carbónico, el protóxido de nitrógeno y el etileno, y después los gases que se llamaban permanentes, uniendo en este último caso á la compresión la acción frigorífica de los líquidos antes obtenidos.

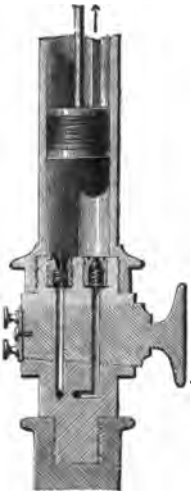


Fig. 212.

206. **Teoría de las máquinas de compresión.** — Sea cual fuere la forma de la máquina empleada, la ley de condensación del gas es siempre la misma. Aquí lo mismo que tratándose del enrarecimiento hay que considerar dos casos: aquel en que no se tiene en cuenta el espacio perjudicial — caso puramente teórico — y aquel en que se tiene en cuenta el espacio perjudicial, que es el verdaderamente práctico.

1°. *Condensación sin espacio perjudicial.* — Sea R la capacidad del recipiente, C la del cuerpo de bomba, H_0 la presión inicial del gas en el recipiente, y H la presión en el depósito, *que suponemos constante*. Al principio, cuando se levanta el émbolo, el cilindro se llena de gas á la presión H y la válvula baja : tenemos, pues, dos masas de gas distintas, una que ocupa el volumen C á la presión H y la otra que ocupa el volumen R á la presión H_0. Cuando se baja el émbolo, la válvula cede y todo el gas del cilindro pasa al recipiente. En este momento se tiene una mezcla gaseosa que ocupa el volumen R á la presión final H_1. Aplicando la ecuación de la mezcla de los gases, se tiene

$$H_1 R = H_0 R + HC, \quad \text{de donde} \quad H_1 = H_0 + H \frac{C}{R};$$

H_1 es la presión en el recipiente después del primer golpe de émbolo. Al cabo del segundo se tendrá análogamente

$$H_2 = H_1 + H \frac{C}{R}, \quad \text{ó bien} \quad H_2 = H_0 + 2H \frac{C}{R}.$$

Después de 3, 4,... n golpes, se tendrá

$$[1] \qquad H_n = H_0 + n\,H\,\frac{C}{R}.$$

Condensación con el espacio perjudicial. — Sea e el espacio perjudicial. Al principio, cuando el émbolo está en lo alto de su carrera, se tienen de la misma manera dos masas de gas distintas, una que ocupa el volumen R á la presión H_0 y la otra el volumen C á la presión H. Pero cuando el émbolo está en la parte inferior de su camino, el gas se reduce al volumen R, aumentado con el volumen e del espacio perjudicial; tiénese, pues, una mezcla gaseosa que ocupa el volumen total $R + e$ á la presión total H_1. La ecuación de la mezcla de los gases da

$$(R + e)\,H_1 = RH_0 + CH, \quad \text{de donde} \quad H_1 = H_0\,\frac{R}{R+e} + H\,\frac{C}{R+e}.$$

De esta manera se pueden calcular las presiones sucesivas H_1, H_2.... H_n, y se tendrá una serie de ecuaciones análogas, de donde será posible deducir una relación final entre H_n, H_0 y los datos del aparato (*el mismo método de eliminación de* H_1, H_2, H_{n-1} *que para la ley del enrarecimiento*). Así se llegará á la fórmula

$$[2] \qquad H_n = H_0\left(\frac{R}{R+e}\right)^n + H\,\frac{C}{e}\left[1 - \left(\frac{R}{R+e}\right)^n\right].$$

207. **Límite de la condensación.** — 1°. *Fórmula.* — Según la fórmula [1] no habría límite de condensación del gas en el recipiente. Con efecto, la presión H_n al cabo de n golpes de émbolo es la suma de n términos de una progresión *aritmética* cuya razón es $\frac{C}{R}$ H. Esta suma puede llegar á ser mayor que toda cantidad dada; para $n = \infty$, se tendría $H_n = \infty$.

Pero este no es más que un caso puramente teórico, toda vez que existe siempre un espacio perjudicial más ó menos grande en las máquinas mejor construídas. Hay pues que aplicar la fórmula [2]. Si se hace en ella $n = \infty$, resulta

$$H_n = \frac{C}{e}\,H = \lambda,$$

es decir que la presión no aumenta indefinidamente en el recipiente; tiende hacia el valor límite λ, que por lo demás nunca alcanza, toda vez que para ello sería necesario dar un número infinito de golpes de émbolo.

2°. *Demostración directa de la fórmula.* — Es posible averiguar λ directamente como en el caso del vacío. En efecto, la máquina cesará de funcionar, por causa del espacio perjudicial, cuando la presión en el recipiente acabe por alcanzar la que el gas tiene en el espacio perjudicial cada vez que el émbolo está en lo más bajo de su carrera. Ahora bien, siendo H la presión inicial del gas que llena el cilindro cuando el émbolo está en lo más elevado de su camino, la presión final cuando esta masa se reduce al volumen e viene dada por la ley de Mariotte. Tiénese

$$\lambda e = HC, \qquad \text{de donde} \qquad \lambda = H\frac{C}{e}.$$

Cuando la presión haya llegado á ser λ en el recipiente, la válvula, que está igualmente comprimida de parte y parte, no se volverá á abrir y la máquina dejará de funcionar.

3°. *Límite práctico de la condensación.* — Las imperfecciones de construcción impiden alcanzar generalmente este límite teórico. Hay pérdidas, que van siendo cada vez más abundantes, y que acaban por ser iguales á las introducciones; en este momento se ha alcanzado el *límite práctico;* ya no se gana nada en darle á la bomba, todo se reduce á mantener la presión máxima.

4°. *Observación general.* — La existencia del espacio perjudicial en las máquinas de compresión no tiene el mismo inconveniente que en las neumáticas. Como en éstas el objeto es enrarecer el aire *cuanto se pueda,* el espacio perjudicial opone al enrarecimiento un límite que se puede traspasar, pero no suprimir. Por el contrario, las máquinas de compresión están destinadas á obtener una presión mayor ó menor, pero determinada. El constructor puede en consecuencia arreglar de antemano la relación de $\frac{C}{e}$, á fin de que el límite teórico λ sea más alto que la presión buscada : en este caso el *espacio perjudicial* no *perjudica* en realidad al efecto definitivo.

TROMPAS ASPIRANTES É INSUFLANTES.

208. **Definiciones. — Principios.** — Llámase *trompas aspirantes é insuflantes* á unos aparatos que *aspiran* el aire de un recipiente para *insuflarlo* ó comprimirlo en otro. Funcionan en cierto modo automáticamente, por medio de una corriente de agua ó de otro líquido.

Consideremos una corriente líquida que circula por un canal de dirección cualquiera, pero de forma particular, que constituye esencialmente la *trompa.* Está formado por dos cilindros del mismo radio reunidos, sea por un conducto cilíndrico más estrecho y continuo (fig. 213), sea por otro discontinuo, compuesto de dos troncos de cono opuestos por sus bases menores (fig. 214). Supongamos que se establezca el régimen permanente de la corriente, es decir, que la velocidad de salida en cada punto del canal, no dependa más que de la posición de este punto y sea independiente del tiempo. Si el líquido corre en el sentido de la flecha, esto es, de *mn* hacia H (fig. 213), de la parte estrecha hacia la ensanchada, la velocidad de la corriente es por fuerza menor en ésta que en la otra, y experimenta por tanto una disminución más ó menos brusca en este intervalo; ahora bien, se observa que al mismo tiempo que la velocidad disminuye la presión ejercida sobre cada capa del líquido aumenta, de manera que si la extremidad ensanchada del canal desemboca en la atmósfera, donde la presión es H, la presión sobre una capa líquida *mn* de la porción estrecha es inferior á H. Así pues, si se practican en el grueso de la pared aberturas *m* y *n*, el aire exterior será impulsado hacia el canal, por causa de la diferencia de las presiones, y arrastrado con la corriente líquida.

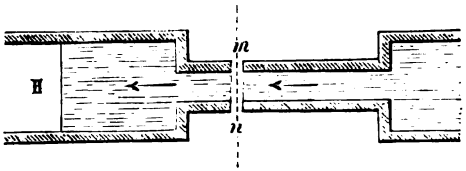


Fig. 213.

Por consiguiente, *se hará el vacío en m,* y si el canal es puesto en comunicación por este orificio con un recipiente de gas, el aparato *podrá hacer el vacío en él.* Si la corriente de agua se dirige hacia H en un recipiente cerrado, el gas se desprenderá del líquido que lo arrastra, y podrá acumularse y comprimirse por sí mismo sobre la superficie libre del líquido : el aparato funcionará en H *como*

una bomba de compresión. En ambos casos la acción de la trompa será lenta, pero continua y automática.

Entre los aparatos fundados en este principio, citaremos.

1°. La *pequeña trompa de agua de Alvergniat* (de simple ó de doble efecto);

2°. La *trompa de mercurio ó aspirador de Sprengel;*

3°. La *máquina insuflante;*

4°. La *trompa aspirante é insuflante de Alvergniat.*

209. **Pequeña trompa de agua de Alvergniat.** — Ésta es un aparato destinado á efectuar rápidamente un vacío imperfecto. El aparato es todo de vidrio (fig. 214). El gollete A se adapta directamente á la llave de una fuente: la salida sigue un régimen permanente; el agua pasa del agregado cónico A al agregado cónico D: la aspiración ocurre en el punto D y el aire es atraído del exterior, penetrando por el gollete B. Si este gollete se encuentra adaptado á un recipiente lleno de gas, se hace rápidamente el vacío en él, hasta una presión igual todo lo más á la tensión máxima que tiene el vapor de agua á la temperatura ambiente; pero se ve que de este modo no se obtiene un *vacío seco.*

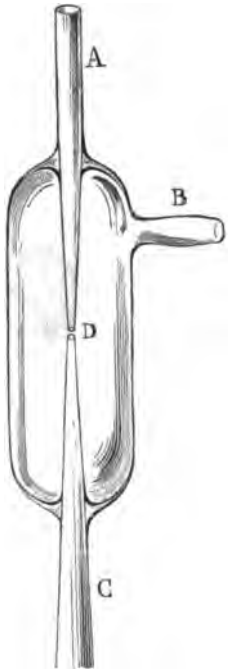


Fig. 214.

Trompa de doble efecto. — Este mismo aparato, protegido por una armadura protectora de hierro y reunido con otro idéntico constituye una trompa de doble efecto.

210. **Aspirador de Sprengel: bomba-trompa de Alvergniat.** — El aspirador de Sprengel es el tipo de las trompas de mercurio. La fig. 215 representa el modelo más reciente y perfecto de aspirador, construído por MM. Alvergniat y Chabaud, con el nombre de *bomba-trompa de mercurio.*

1°. *Descripción.* — El aparato es completamente de vidrio. Compónese de una máquina ó bomba de mercurio ordinaria, reunida con un aspirador de seis caídas ó descensos de mercurio. La *bomba* está representada á la derecha del grabado y comprende el mecanismo M, el recipiente móvil R, los dos tubos T y T' unidos por medio de otro de caucho, y finalmente la ampolla A, con el tubo abductor *mn* por una parte y los tubos de aspiración *pqf* por otra. La *trompa* está representada á la izquierda de la figura, y comprende el recipiente móvil R, el grueso tubo T y el pequeño tubo lateral *ab*, unidos entre sí por el caucho, así como por la ampolla A' con las llaves *r* y *r'*, por el tubo descendente *cd*, el doble tubo ascendente *dt* y *dt'* y, finalmente, por las dos trompas de triple descenso *t* y *t'*, que van á terminar en la cubeta C.

2°. *Manipulación.* — El recipiente donde se quiere hacer el vacío es puesto en comunicación con el aparato por medio del tubo lateral *f*. Empiézase el vacío con la bomba propiamente dicha y después se le acaba valiéndose de la trompa.

Para hacer funcionar sola la bomba, se da vuelta á la llave de tres conductos *r* de modo que se intercepte toda comunicación entre el tubo T' por una parte y la cubeta así como el tubo *ab* por otra. De este modo quedan enteramente separadas las dos partes del aparato. Entonces se maneja la bomba de mercurio como precedentemente se ha indicado; el aire es atraído por los tubos *f*, *q*, *p* á la ampolla A y es expulsado de ésta por el tubo abductor *mn*, que va á desembocar en el mercurio de la cubeta.

Cuando se quiere terminar el vacío, hay que dar primeramente vuelta á la llave *r*, de manera que intercepte la comunicación entre el recipiente R y el tubo T', estableciéndola por el contrario entre R y la trompa propiamente dicha, mediante la ampolla A' y el tubo *ab*. — Por lo demás, la comunicación queda cerrada también por la llave *r''* entre el recipiente R y la cubeta. Hecho esto, se

levanta el recipiente móvil por medio del mecanismo M hasta una altura suficiente : el mercurio sube á la vez en la otra rama de este sistema de vasos comunicantes y vuelve lentamente hasta el vértice *tt'* de las trompas, siguiendo el camino A' *abcd* y *t* ó *t'* : desde allí cae gota á gota por las seis ramas descendentes causando la aspiración del aire, que viene desde el recipiente de gas por los dos caminos *fh't* y *fh'ht*.

3°. *Pormenores* — A'. Siempre hay una capa de aire más ó menos gruesa que adhiere á la superficie interior del tubo de caucho. Como el mercurio ascendente lo arrastra, este aire podría estorbar ciertamente el trabajo de la trompa y limitar el grado del vacío, como una especie de espacio perjudicial.

Pero la ampolla *A'*, colocada á la entrada del tubo *ab* (como la ampolla Bunten en el barómetro de sifón), sirve para coger al paso y atraer el aire arrastrado. Una vez llena, se la vacía por el tubo abductor que la llave *r''*, gobierna.

r. En el aspirador ordinario había que subir á mano hasta el vértice de la trompa, el mercurio caído en la cubeta. Esta cansada maniobra es sustituída aquí por la más fácil de la bomba de Alvergniat. Basta dar vuelta convenientemente á la llave *r* y con bajar el recipiente móvil para que penetre en él todo el mercurio de la cubeta.

A." La ampolla A" es una aforadora de Mac Leod, destinada á medir la débil tensión del residuo gaseoso cuando se ha alcanzado el límite del vacío.

Observación. — La sustitución del agua por el mercurio para efectuar la absorción del aire permite obtener en el recipiente de gas un vacío *absolutamente seco*.

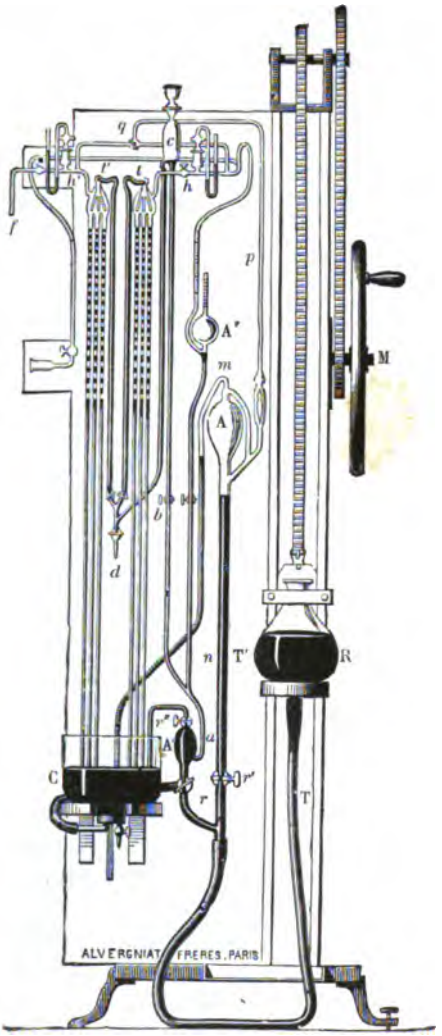


Fig. 215.

211. **Aspirador ordinario de Sprengel.** — Este es un aspirador de un solo descenso, que por tanto hace el vacío seco seis veces menos de prisa que la bomba-trompa de Alvergniat. Además exige para efectuar el vacío el empleo de una bomba de mercurio ó de otra máquina neumática, es decir, un segundo aparato distinto de la trompa.

212. **Máquina insuflante ó trompa de agua.** — Es posible procurarse aire compri-

mido de manera continua por medio de una disposición instalada de manera fija y que se llama la *trompa de agua* ó *máquina insuflante*. Vamos á indicar su principio.

El agua del servicio público ó de una fuente cercana llega por un conducto ordinario hasta una especie de depósito E (fig. 216), desde donde cae en el tubo E*m* y sale por el añadido cónico afilado *m*. La absorción de aire se efectúa en

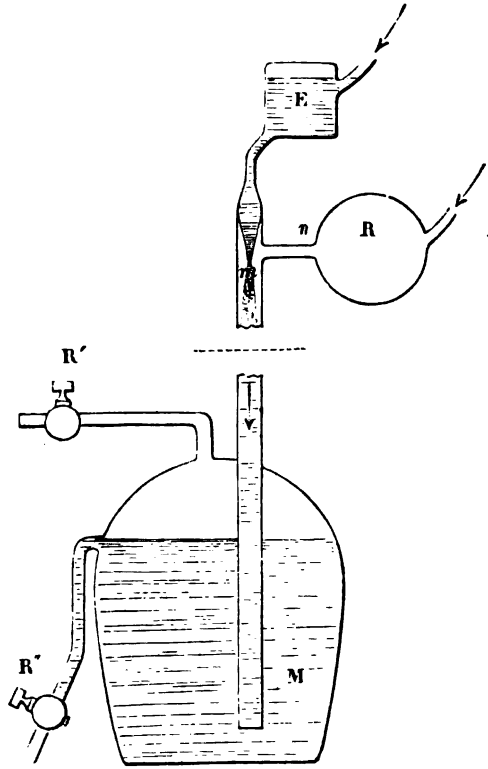


Fig. 216.

m, por un orificio que comunica sea con un gasómetro, sea con la atmósfera. El gas arrastrado por la corriente líquida se separa de ella en el depósito de agua M y va á acumularse en la parte alta del depósito inferior. Allí se comprime á sí mismo sobre la superficie libre del líquido, y adquiere fuerza elástica creciente, hasta que se le abra una salida por el tubo abductor de llave R', que lo lleva á los puntos del laboratorio donde se quiere utilizarlo. La presión adquirida por la masa gaseosa es tanto mayor cuanto más elevado está el nivel en el depósito E sobre el del depósito inferior.

213. **Aplicaciones del aire comprimido y del aire enrarecido.** — El aire comprimido, solo unas veces y otras concurrentemente con el enrarecido, es objeto hace ya mucho tiempo de aplicaciones cada vez

más interesantes y numerosas. El comprimido hace casi siempre veces de un muelle metálico, donde se acumula cantidad de trabajo más ó menos considerable, para gastarlo luego, al dar expansión al fluido, en un momento y punto determinados, y en condiciones de utilización favorables. Ya se realiza esta expansión de manera brusca é intermitente, como en el *fusil de viento*, el *correo ó telégrafo neumático*, los *relojes neumáticos* y el *freno Westinghouse;* ya de modo lento, progresivo y continuo, como en los antiguos *caminos de hierro atmosféricos* (Kingstown, San Germán) ó bien en los recientes sistemas de locomoción ó de transporte por aire comprimido (*coche automóvil Mekarski*, *locomotora Ribourt*); en las *máquinas perforadoras*, que se inventaron para horadar los túneles del Monte Cenis, del San Gotardo y del Arlberg; y por fin, en los aparatos de aire comprimido imaginados para ejecutar debajo del agua ciertas obras, como la perforación de los pozos de mina ó echar los cimientos de los estribos de los puentes (*campanas de buzo*, *escafandras*, *aparatos Triger*).

214. **Fusil de viento.** — El *fusil de viento* es una de las aplicaciones más antiguas del aire comprimido; y el *arcabuz de aire* se usó algún tiempo en los ejércitos. Hoy se ha convertido únicamente en un curioso instrumento de física.

El *fusil de viento* tiene el aspecto exterior de los ordinarios (fig. 217, I); sin embargo, su cañón es más largo, porque hay interés en prolongar la acción del aire

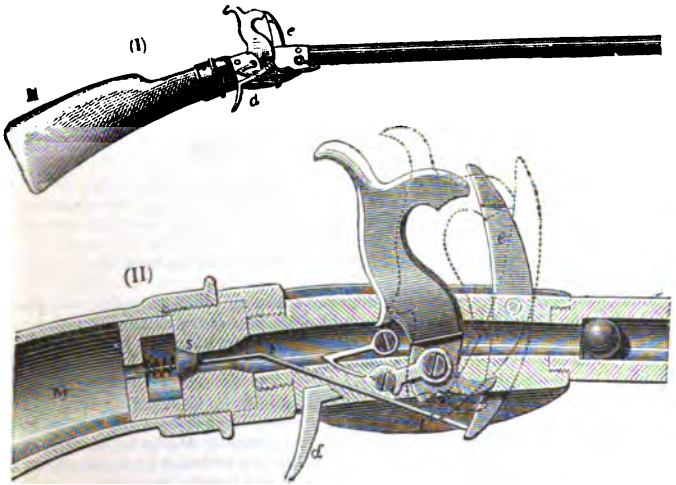


Fig. 217.

comprimido; pues bien, la expansión del aire actúa evidentemente todo el tiempo que tarda el proyectil en ser expulsado del alma del cañón. La fig. 217, II representa en sección el mecanismo del instrumento.

Encuéntrase el depósito de aire comprimido en la *culata* misma M, que es hueca y consiste en una caja metálica muy resistente: el aire se comprime allí á una presión que es por lo menos igual á 8 ó 10 atmósferas. La comunicación

entre el depósito y el tubo del cañón, que contiene la bala, puede abrirse á voluntad mediante una válvula cónica S. En el momento del descanso, la válvula es mantenida contra el orificio del depósito por el mismo aire comprimido, y no hay comunicación; pero si se aprieta el *gatillo d*, cae el *martillo* sobre una pequeña palanca *e* cuyo otro brazo empuja entonces al vástago H', que obliga á la válvula á abrirse bruscamente, dejando el paso libre al aire comprimido. Éste se dilata y lanza la bala, con velocidad que depende de la fuerza elástica inicial.

Esta velocidad puede ser tan grande como en los fusiles ordinarios: pero va disminuyendo en las descargas siguientes á medida que se vacía el depósito. De manera que al cabo de corto número de disparos hay que volver á cargar, es decir, llenar de nuevo la culata con aire comprimido.

215. **Correo neumático**[1]. — Hace ya algunos años[2] que el servicio telegráfico en las grandes ciudades se efectúa por medio del aire comprimido, y no de la electricidad.

Los despachos no se expiden separadamente, sino que van reunidos en grupos de 30 á 40 en estuches de latón cubiertos de cuero. Salen al mismo tiempo diez de estos estuches, formando con un émbolo una especie de *tren* del peso de 4 kilogramos. (La figura 218 representa el émbolo y un estuche abierto). Este tren circula, no por una vía férrea sino por dentro de un *tubo* de fundición, de

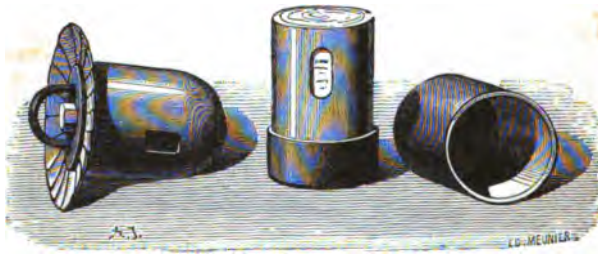


Fig. 218.

0,065 m. de diámetro y de 1 á 2 kilómetros de longitud, que enlaza dos estaciones subterráneamente. En la de salida *lo empuja* un depósito de aire comprimido, al mismo tiempo que otro depósito de aire enrarecido *lo aspira* desde la estación de destino. La diferencia entre las presiones ejercidas sobre las dos caras del tren no pasa de 3/4 de atmósfera, pero basta para comunicarle velocidad media de 1 kilómetro por minuto.

Toda la ciudad de París y sus alrededores están servidos actualmente por una red completa de tubos neumáticos; pero la distancia entre dos estaciones consecutivas sigue limitada á unos 2 kilómetros próximamente por causa de la disminución rápida que resulta en la tensión de aire comprimido por efecto de la distancia[3].

216. **Relojes neumáticos.** — Desde 1880 existe en París una red de conductos de aire comprimido que distribuye la hora en París: ese servicio transmite la hora de un reloj central (con ligero retraso, mayor ó menor según la distancia) á diversos puntos de la capital, así como á las casas particulares donde hay instalados relojes secundarios, llamados *relojes neumáticos*, que comunican con el principal.

1. Llamado también, aunque impropiamente, *telégrafo neumático*.
2. Este nuevo sistema se inauguró en Londres el año 1854; París lo aplicó en 1865.
3. La velocidad de los trenes varía en razón inversa de la raíz cuadrada de las longitudes en los tubos de análoga sección. Así, siendo la velocidad inicial de 20 m. por segundo en un tubo de 1000 m. (bajo la presión de 1 atmósfera) sólo será de 6 metros próximamente en un tubo de 10 kilómetros, y de 4,50 m. en uno de 20 kilóm.

De modo que el sistema completo exige : 1°. un centro, provisto de máquinas de compresión, depósitos de aire comprimido, un reloj *normal* ó *director* y el *mecanismo de distribución ;* 2°. los relojes *secundarios* ó *receptores*, diseminados por los diferentes barrios ; y 3°. finalmente, la canalización que propaga, desde el centro á la periferia, la acción del aire comprimido.

El *reloj-tipo* es un reloj ordinario provisto además de una excéntrica que, en el momento preciso en que el minutero marca *cada minuto*, descalza un órgano que pone en movimiento el mecanismo de distribución. Éste consiste en una especie de caja como la de las máquinas de vapor, que pone en comunicación la canalización cuando llega el momento oportuno con grandes cilindros, llamados *depósitos de alta presión*, donde se mantiene el aire comprimido á presión constante de varias atmósferas. El aire lanzado á cada minuto á través de la canalización no tiene por lo demás sino un excedente de presión de siete décimos de atmósfera ; esto basta para poner en movimiento el mecanismo de los relojes receptores.

Éstos no son verdaderos relojes, sino unas muestras provistas de dos minuteros, que andan gracias á un mecanismo particular (fig. 219). El flujo del aire comprimido llega por un tubo C á un pequeño fuelle S (fig. 220), contenido en un tambor metálico Y. En estado de reposo, el fuelle permanece plegado sobre sí mismo (fig. 220, I); el flujo de aire llega á inflarlo cada minuto (fig. 220, II) y á

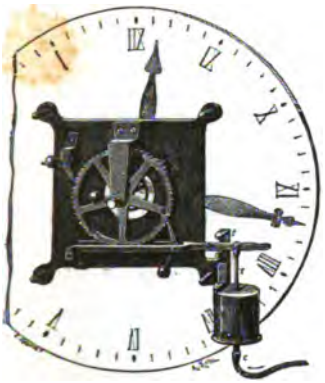


Fig. 219.

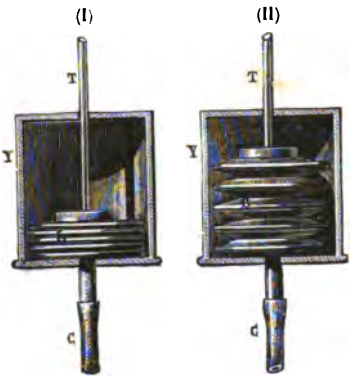


Fig. 220.

impulsar al mismo tiempo un vástago T fijo en su cara superior. El movimiento de este vástago T levanta una palanca *l*, articulada en A (fig. 219), que por medio de un tope *r* hace adelantar un diente á la rueda dentada R. El eje de esta rueda es el que sostiene el minutero ; como la rueda tiene sesenta dientes, cada vuelta completa corresponde á una hora y provoca un movimiento correspondiente en el horario.

217. **Frenos automotores. — Frenos Westinghouse.** — Recientemente se ha aplicado el aire comprimido al manejo de los frenos de coches de camino de hierro. Un conducto de aire comprimido que corre por todo lo largo del tren comunica con los frenos, que son automáticos y se apretarían por sí mismos si no les impidiera hacerlo de manera continua la acción del aire comprimido. Toda interrupción, accidental ó intencional en el conducto, suprime instantáneamente la acción del aire comprimido y provoca la parada automática. Gracias á este mecanismo, un tren lanzado á gran velocidad es detenido en unos cuantos segundos.

218. **Caminos de hierro atmosféricos.** — Esta es más bien una aplicación del aire enrarecido que del comprimido, y sólo tiene interés histórico pues ha caído en desuso [1].

1. Este modo de locomoción era mucho más costoso que el empleo de las locomotoras de vapor.

El camino de hierro atmosférico más conocido es el que funcionó en Francia durante algún tiempo en la rápida pendiente (0,033 m. por metro) de la línea del Pecq á San Germán [1]. En medio de la vía férrea se encontraba un tubo neumático, de 63 centímetros de diámetro, donde se hacía el vacío, por delante del tren, por medio de máquinas neumáticas situadas en la estación de San Germán y que eran movidas por el vapor. Todo el tren era arrastrado por un émbolo unido al primer coche é impulsado hacia delante en el tubo por la presión atmosférica. El tubo estaba provisto en su parte superior de una hendidura longitudinal por donde pasaba la lámina ó vástago fijo que unía el émbolo con el wagón (fig. 221). Delante del émbolo, esto es, por la parte del vacío, se encontraba cerrada la hendidura por una banda de cuero, provista de pequeñas placas de latón, que hace veces de válvula [2]; una serie de ruedecillas, de magnitudes decrecientes, mantenidas por la armadura del émbolo, levantaban esta válvula á medida que iba andando la lámina de enlace del émbolo.

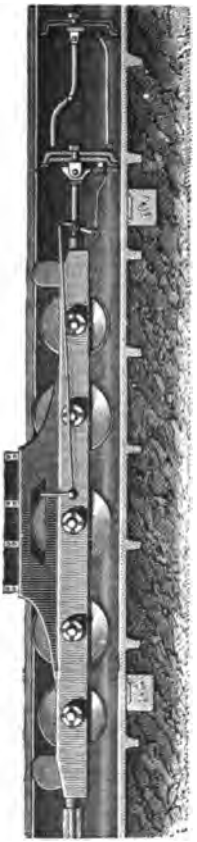


Fig. 221.

Las dimensiones del tubo y de las máquinas fueron calculadas de modo que un tren de 54 toneladas tenía velocidad de 1 kilómetro por minuto, con un exceso de presión de 1/3 de atmósfera próximamente.

219. **Motores de aire comprimido.** — En estos últimos años se han construído verdaderos motores que pueden servir, lo mismo que las locomotoras, para la tracción de materiales y el transporte de viajeros, motores en que el aire comprimido desempeña funciones análogas á las del vapor de agua.

Coche automóvil Mekarski. — El tranvía de la plaza de la Estrella á Courbevoie en París se instaló en 1875 con uno de esos motores. El aparato estaba instalado debajo de la armadura del coche, entre sus ruedas. Es un mecanismo análogo al de las máquinas de vapor, pero que funciona por la acción del aire comprimido. En vez de caldera de vapor, el coche llevaba consigo depósitos cilíndricos, muy resistentes, donde se comprimía el aire hasta 25 atmósferas, mediante bombas fijas colocadas en una de las estaciones. Lo que constituía la novedad del sistema Mekarski era un *regulador de presión*, por cuya intervención salía el aire de los depósitos con presión decreciente para entrar en el mecanismo motor con presión constante. Además, para evitar el enfriamiento debido á la expansión del gas, se tenía cuidado de hacer pasar el aire comprimido por un depósito de agua sobrecalentada á 150° antes de utilizarla en el motor.

220. **Máquinas perforadoras.** — El aire comprimido ha desempeñado papel más importante todavía en los grandes trabajos de perforación del San Gotardo, así como en las obras anteriores del Monte Cenis.

Construyéronse, en efecto, con tal fin, según una idea de MM. D. Colladon y de Caligny, máquinas especiales de horadar, llamadas *máquinas perforadoras*, movidas por el aire comprimido.

Las primeras máquinas perforadoras, las del Monte Cenis, se componían de

1. El primero construído (1848) fué el de Kingstown á Dalkey, en Irlanda; tenía 3 kilómetros.

2. Véase para ampliar esta parte el *Monde physique* de Guillaumin, tomo I.

una docena de puntas, en forma de *floretes*, instaladas en una misma cureña móvil sobre rieles; otra carretilla, unida á la cureña, llevaba depósitos de agua y de aire comprimido. Cada florete estaba animado de tres movimientos simultáneos, indispensables á la naturaleza del trabajo que se iba á ejecutar: 1°. uno de vaivén longitudinal, que producía choques repetidos sobre la roca; 2°. uno giratorio helicoidal, análogo al de una barrena, que producía la penetración; 3°. de un movimiento de progresión, paralela al eje del instrumento y proporcional á la velocidad de la perforación. Este triple movimiento era comunicado á las puntas por el aire comprimido.

La compresión del aire se obtenía por medio de máquinas especiales que tomaban la fuerza motriz necesaria á las cascadas de los alrededores, de manera *que la montaña fué horadada con ayuda de la fuerza motora de sus propios torrentes.* La presión suministrada á las máquinas era de 7 atmósferas; el excedente de aire comprimido era lanzado á las galerías para mantener su aeración en buenas condiciones higiénicas.

Después del Monte Cenis fué perforado de norte á sud el núcleo del San Gotardo, entre las aldeas de Goschenen y de Airolo, donde se practicó un túnel de vía doble, más largo que el precedente. Las dificultades superaron á las del Monte Cenis, porque la masa de rocas que fué preciso extraer era más considerable y las capas del terreno más duras. Así es que se necesitó recurrir á máquinas y métodos perfeccionados.

Estos métodos y máquinas, mejorados aún, sirvieron para perforar el túnel de la garganta del Arlberg, que atraviesa el núcleo del Vorarlberg, estableciendo comunicación directa entre la Suiza y el Tirol.

Para darse cuenta de los progresos sucesivamente realizados, basta comparar las duraciones sucesivas de estos gigantescos trabajos. La perforación del Monte Cenis (12.230 m.) duró 14 años; la del San Gotardo (14.912 m.) sólo 9 y medio; la del Arlberg (10.240 m.) terminó en menos de 3 años y medio.

221. **Trabajos submarinos: campana de buzo, aparato Triger, escafandra.** — El aire comprimido es también el que ha permitido efectuar, con facilidad relativa y seguridad casi absoluta, ya trabajos bajo el agua de los ríos y de los mares; ya sencillas exploraciones, como la pesca de las esponjas, de las ostras perleras ó de los restos de naufragios; ya grandes obras de ingeniería, como la perforación de los pozos de mina ó el establecimiento de las estribaciones de los puentes.

1°. *Campana de buzo.* — El origen y primitivo modelo de estos aparatos es la antigua *campana de buzo*, que era una ancha campana llena de aire, abierta por la parte inferior, y herméticamente cerrada en lo alto, que se bajaba con los instrumentos y los obreros hasta el fondo en que se había de trabajar.

2°. *Aparato Triger.* — El primer progreso que se realizó consistía en mandar el aire desde la atmósfera exterior á la campana, para renovar el aire viciado. Otro mayor se debió al ingeniero Triger[1] quien tuvo la idea de enviar á la campana *aire comprimido*, que no sólo alimenta de fluido respirable á los hombres sino que además les permite trabajar casi á pie enjuto, pues expulsa el agua de la campana.

Los cuatro estribos del puente de Kehl y más recientemente los del puente gigantesco de San Luis sobre el Mississipí se construyeron con el aparato Triger.

Observación. — El paso de la presión exterior á la interior, que es dos ó tres veces mayor, no dejaría de presentar peligro para la salud de los obreros si se efectuara bruscamente. Así es que los hombres no penetran en seguida en la campana ni salen tampoco directamente de ahí. Primero penetran en una cámara lateral, que se encuentra á la presión exterior; una vez allí, cierran la puerta, y abren una llave que da á una de las chimeneas laterales y que establece la comunicación y la igualdad de presión entre los dos compartimientos inmediatos. Entonces puede empujar una puerta, que se abre de fuera adentro y que antes permanecía cerrada por el exceso de presión, y penetra en la chimenea lateral por donde baja al fondo de la campana. Para salir se efectúa la maniobra inversa.

3°. *Escafandra.* — Un perfeccionamiento más sencillo de la campana de buzo es la *escafandra*[1], aparato diariamente usado por los buzos, sea en los puertos para

1. En 1841.
1. De σκάφη, bajel, y ἀνήρ, ἀνδρός, hombre.

trabajos submarinos, sea en los mares del Archipiélago griego para recoger esponjas. Compónese (fig. 222) de una especie de casco, que puede adaptarse sólidamente á la cabeza y hombros del buzo, y que está en comunicación permanente con una caja de aire, colocada sobre su espalda como una mochila de

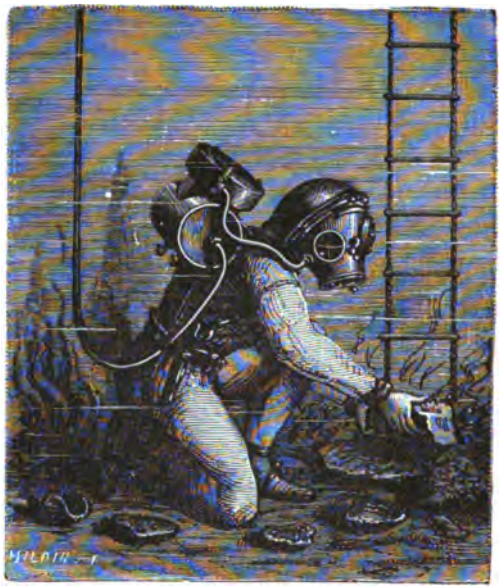


Fig. 222.

soldado; un tubo, que el buzo arrastra consigo, lleva al depósito aire comprimido (á una presión igual á la que se ejerce en el fondo del agua). El aire respirado puede salir por aberturas convenientemente dispuestas. El buzo puede ver y guiarse mediante otras aberturas, herméticamente cerradas con vidrios y protegidas por enrejados. Una cuerda atada á su cintura sirve para subirlo cuando lo desee mediante señal convenida.

LIBRO V

COMPLEMENTOS : NOCIONES DE HIDRODINÁMICA. COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS. — NOCIONES DE CAPILARIDAD.

CAPÍTULO PRIMERO

NOCIONES DE HIDRODINÁMICA.

PRINCIPIO DE TORRICELLI Y APLICACIONES. — BOMBAS Y SIFONES.

222. Principio de Torricelli : Enunciado y fórmula. — Cuando un líquido grave está en equilibrio dentro de un vaso A, si se practica una abertura en un punto O de la pared, el líquido sale, y al mismo tiempo queda roto el equilibrio de las presiones. La velocidad que tiene cada molécula líquida, en el momento de pasar por el orificio, se determina por el principio siguiente, debido á Torricelli :

La velocidad de un líquido que sale por un pequeño orificio practicado en una pared delgada es igual á la que tomaría un cuerpo que cayese libremente en el vacío desde la superficie libre hasta el centro del orificio.

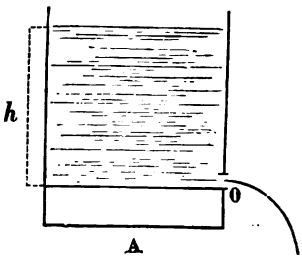


Fig. 223.

Llamando V á esta velocidad, h á la altura que tiene el nivel en el instante considerado sobre el centro del orificio (fig. 223), se tiene, con arreglo á las leyes del descenso de los cuerpos *en el vacío*,

$$[1] \qquad V = \sqrt{2gh}.$$

Esto es lo que se llama la *fórmula de Torricelli* y el enunciado anterior constituye el *Principio* ó *Regla de Torricelli.*

223. **Demostración del principio.** — Torricelli se contentó con un experimento muy sencillo para comprobar su fórmula. En efecto, se limitó á observar que un chorro líquido que saliera por el orificio O siguiendo la vertical llegaba sensiblemente á la misma altura que el nivel MN en el vaso (fig. 224).

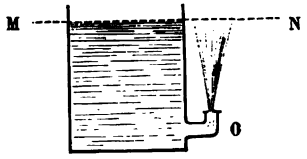


Fig. 224.

Daniel Bernouilli trató el problema por el cálculo, suponiendo : 1°. que el orificio se practicaba en una pared infinitamente delgada ; 2°. que su diámetro era infinitamente pequeño con relación al del vaso ; 3°. que las moléculas líquidas que salen á cada instante del vaso, proceden directamente de la superficie libre ; 4°. que la gravedad es la única fuerza que interviene en la salida.

Aplicando sencillamente el teorema del trabajo y de las fuerzas vivas para el intervalo de tiempo pequeñísimo en que una pequeña masa m del líquido sale del frasco, se llega á la fórmula de Bernouilli :

$$V = \sqrt{2g\left(h + \frac{p - p'}{d}\right)}; \qquad [2]$$

V es la velocidad de salida en el instante considerado, d representa el peso específico del líquido, p y p' las presiones que sobre éste se ejercen, arriba en la superficie libre y abajo en el orificio, en el medio ambiente donde se produce la salida.

En el caso actual, la salida se efectúa en la atmósfera : $(p - p')$ es pues el peso de una columna de aire que tiene por base la unidad de superficie y por altura la distancia h del orificio á la superficie libre. Llamando a al peso específico del aire, en las circunstancias de temperatura y de presión en que se opera, la fórmula pasa á ser :

$$V = \sqrt{2gh\left(1 + \frac{a}{d}\right)}. \qquad [2\ bis]$$

Como la fracción $\frac{a}{d}$ es generalmente despreciable en comparación á la unidad, resulta de nuevo la fórmula de Torricelli : $V = \sqrt{2gh}$.

Otra fórmula. — Es posible calcular el valor de las presiones exteriores p y p' en columnas del líquido que sale. Llamando H y H' á las alturas de los cilindros de este líquido que bastarían á equilibrar las presiones p y p' (por unidad de superficie) se tiene

$$p = Hd \qquad \text{y} \qquad p' = H'd.$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula, resulta

$$V = \sqrt{2g\,(h + H - H')}. \qquad [3]$$

224. **Demostración experimental de la fórmula de Torricelli.** — Puede demostrarse la fórmula *a posteriori* por dos métodos, uno que se funda en la forma que toma el chorro (ó *vena líquida*) al salir del vaso y el otro en el *gasto*, quiere decir en la cantidad de líquido que sale en un tiempo dado.

1°. *Forma de la vena líquida.* — Sea V la velocidad de una molécula líquida en el momento que sale del orificio.

Si éste se encuentra en pared plana vertical, la velocidad V es horizontal. Apenas fuera la molécula, queda sometida al efecto de la gravedad. Encuéntrase pues animada de dos movimientos simultáneos, uno uniforme, rectilíneo y horizontal, procedente de la velocidad inicial V, y el otro uniformemente acelerado, rectilíneo y vertical, debido á la acción de la gravedad.

La trayectoria del movimiento resultante es una *parábola*, que tiene por *vértice* el punto de partida de la molécula, por *tangente en el vértice* la dirección del movimiento uniforme y por *eje* la dirección del movimiento uniformemente acelerado. Cada una de las moléculas líquidas que pasa por el orificio, al mismo

tiempo que la precedente, se encuentra en las mismas condiciones y describe una parábola idéntica. El conjunto de estas *trayectorias materiales* constituye un volumen parabólico que es la *vena líquida*.

Midiendo la *amplitud* (ó *alcance*) a de la vena sobre un plano como M''M, situado á una distancia h' del orificio, se podrá deducir su velocidad inicial V, y, comparándola con el número indicado por la fórmula, probar la exactitud de ésta.

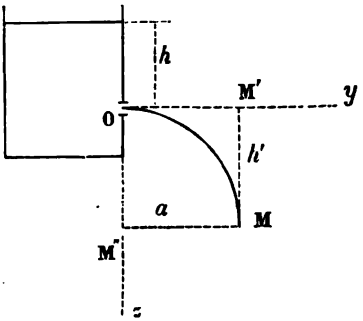


Fig. 225.

La relación que expresa el valor de V en función de a y de h' es precisamente la ecuación de una de las parábolas que constituyen la vena. Escribamos, sea por ejemplo, la que corresponde al centro del orificio (fig. 225). Tomemos como ejes de las coordenadas la dirección Oy de la velocidad inicial V y la dirección vertical Oz. Sea M la posición de la molécula al cabo del tiempo t. Resulta evidentemente:

para la abscisa OM'. . . . . $y = Vt$

y para la ordenada MM'. . . . . $z = \frac{1}{2} gt^2$.

Eliminando t entre estas dos igualdades, resulta

$$y^2 = 2\frac{V^2}{g} z.$$

Esta es la *ecuación de la parábola*. Dando en ella á z el valor h' que corresponde al plano MM', se tiene el valor a de la amplitud:

$$a^2 = 2\frac{V^2}{g} h', \qquad \text{de donde} \qquad V = a\sqrt{\frac{g}{2h'}}.$$

Sólo falta calcular a y comparar V con el valor teórico $\sqrt{2gh}$.

Este cálculo se efectúa fácilmente mediante un aparato muy sencillo que da realidad al precedente dispositivo [1]. La demostración es muy satisfactoria.

2°. *Gasto. — Construcción de la vena líquida.* — Llámase *gasto* al volumen líquido que sale durante un tiempo dado. Es fácil calcularlo de antemano, partiendo de la fórmula de Torricelli. En efecto, si S es la sección del orificio, θ el intervalo de tiempo considerado, V la velocidad dada por la fórmula, el agua vertida forma un cilindro que tiene como base S y como longitud Vθ. Tiénese, pues

$$D = SV\theta = S\theta\sqrt{2gh}.$$

La fórmula se demuestra fácilmente pesando el líquido derramado y dividiendo este peso por la densidad.

Los números obtenidos de esta manera son siempre muy diferentes de los teóricos, é *inferiores á ellos en grado notable*. Esta anomalía se debe á una circunstancia particular que no hemos tenido en cuenta al calcular el gasto teórico, á saber, que la vena líquida es *cónica* á la salida del vaso y no se hace *cilíndrica* sino á cierta distancia; ahora bien, la sección del cilindro que sucede al tronco de cono inicial es más pequeña que el orificio (se la llama *sección contraída*): es igual á una fracción c del orificio, que se llama *coeficiente de contracción*. Dado un mismo líquido, c varía con la forma y la magnitud del orificio y con la carga. Así, para orificios circulares cuyo diámetro esté comprendido entre 2 cm y 16 cm y para una carga inferior á 6,80 cm, se tiene $c = 0{,}62$.

1. Véase el *Traité d'hydraulique* de Dubuisson.

Si se tiene en cuenta esta circunstancia en el cálculo del gasto, quiere decir, si se sustituye la superficie S del orificio por la de la sección contraída c S, se encuentran números que están sensiblemente acordes con las medidas directas.

225. **Vaso de Mariotte.** — El *vaso* ó *frasco* de Mariotte es un aparato que permite obtener la salida constante de un líquido. También puede servir para demostrar varias consecuencias del teorema de Torricelli.

Fig. 226.

Compónese sencillamente de un frasco bastante grande, cerrado por un tapón qué atraviesa un tubo de vidrio abierto en sus dos extremidades (fig. 226). En la pared del frasco se encuentran verticalmente tres golletes ó conductos muy pequeños a, b, c, de orificio estrecho; estos golletes pueden cerrarse con pequeños tapones de palo.

Funcionamiento. — Se empieza por llenar enteramente de agua el frasco y el tubo, hasta g. Supondremos que el orificio inferior de este último termine en l, en el intervalo de los conductos, b y c. Hay que considerar tres casos, según que se abran separadamente uno de los tres orificios a, b y c. El caso práctico, el de la salida constante, es el último. Los otros dos son puramente teóricos y sirven de demostración al principio de Torricelli.

1°. *Está abierto sólo el orificio* b. — Si se abre primeramente el conducto b, hay salida, el nivel baja en el tubo g, y así que el nivel es allí el mismo que en b, la salida se para. Estos fenómenos se explican por el exceso de presión que se efectuaba al principio en b, de dentro á fuera, exceso de presión que desaparece cuando el nivel en el tubo g es el mismo que en b. Efectivamente, antes de que la salida empezara, la presión en todos los puntos de la capa horizontal be no era la misma. En e se componía de la presión atmosférica, *más* el peso de la columna de agua ge, mientras que en b la presión es únicamente igual á la de la atmósfera. Pero una vez que el nivel es el mismo en e y b, hay equilibrio, porque entonces la presión es la misma sobre todos los puntos de la capa be, tanto en el frasco como en el tubo.

2°. *Sólo está abierto el orificio* a. — Si entonces se cierra el conducto b y se abre el a, no hay salida; por el contrario, el aire penetra en el frasco por el orificio a, y el agua sube de nuevo en el tubo g hasta la capa ad, de modo que se restablezca el equilibrio y que la presión sea la misma en todos los puntos de la capa horizontal ad.

3°. *Sólo está abierto el orificio* c. — Hallándose cerrados los orificios a y b, se abre el conducto c. En este caso el agua empieza por salir, con velocidad decreciente, hasta que el nivel baja en el tubo g al punto l. Á partir de este momento, la salida continúa *con velocidad constante*, que está dada por la fórmula de Torricelli, $V = \sqrt{2gz}$ (llamando z á la altura lh). Al mismo tiempo el aire entra burbuja á burbuja por el orificio l y llega entonces á la parte superior del frasco. Esto dura mientras el nivel del agua en el frasco no se coloca por debajo del orificio l.

Esta salida constante se explica por el hecho de que la carga, es decir, la presión que se ejerce sobre la capa horizontal mh, es *invariablemente igual* á la presión de la atmósfera, aumentada con la de la columna de agua hl. Calculemos en efecto el valor de esta carga en un instante cualquiera, por ejemplo cuando

el nivel baja hasta el plano *ad*. El aire que ha penetrado en el frasco se encuentra entonces á una presión $(H - dl)$; ahora bien, la capa *mh* soporta además el peso de la columna de agua dl; luego la presión transmitida sobre la capa *mh* es en realidad $H - dl + dl + lh$, quiere decir $H + lh$.

Esta presión sigue siendo la misma cuando el nivel baja á *be*, y así sucesivamente mientras el nivel está por encima del orificio l: la presión sobre la capa *mh* es pues *constante*, y por tanto ocurre lo mismo con la velocidad de salida. Pero una vez que el nivel ha llegado por debajo del orificio l, esta presión, y la velocidad de salida al mismo tiempo, van disminuyendo continuamente.

Observación. — Puede realizarse este aparato para obtener la salida regular de un gas. En este caso, precisa evidentemente expulsar el gas de su depósito haciendo llegar á éste el agua que cae del frasco de Mariotte. Si se aspirase directamente el gas haciendo comunicar la extremidad *g* del tubo recto con el gasómetro, no se obtendría una velocidad de aspiración constante, toda vez que la presión del gas aspirado en el frasco iría disminuyendo continuamente.

226. Salida de un líquido en contacto con una masa limitada de aire. — Otro caso muy interesante de la salida de los líquidos es aquel en que su superficie libre, en vez de hallarse en comunicación directa con la atmósfera, está en contacto con una masa limitada de aire, cuya fuerza elástica es superior ó inferior á la presión exterior.

Si h_0 es la *carga* inicial, quiere decir, la distancia vertical de la superficie libre al orificio, la salida empieza con una velocidad V_0, que está determinada por la fórmula de Bernouilli,

$$V_0 = \sqrt{2g\left(h_0 + \frac{p_0 - p'}{d}\right)}.$$

en que p_0 designa la presión interior al principio y p' la presión exterior.

Ahora bien, mientras p' es constante, p_0 diminuye continuamente, á medida que el vaso se vacía, por efecto del aumento de volumen del aire confinado. Luego, al mismo tiempo que la carga h_0 inicial disminuye y toma un valor h, continuamente decreciente, la diferencia de las presiones $(p_0 - p')$ disminuye también, se anula luego y al fin se hace negativa. Cuando ha alcanzado el valor absoluto hd, la cantidad que se encuentra debajo del signo radical, y por consiguiente la velocidad de salida, es nula : la salida no debe continuar.

Cálculo de la carga final h_1. — Propongámonos buscar la carga final. Sea p' $(= Hd)$ la presión exterior (que es constante), calculada en columnas del líquido; sea p_1 $(= H_1 d)$ la presión final del aire confinado. La ecuación del problema será $h + H_1 - H = 0$.

Exprésase H_1 en función de H aplicando la ley de Mariotte, y se llega á una ecuación de 2° grado de donde se saca (llamando l á la longitud del vaso y suponiendo la sección igual á la unidad),

$$h = \frac{H + l}{2} = \sqrt{\frac{(H + l)^2}{4} - Hh_0}.$$

Una sola de las raíces conviene aquí, y es la correspondiente al radical negativo, pues la otra es de manera manifiesta mayor que l.

Aplicación. — Este cálculo tiene su aplicación en la teoría completa de multitud de aparatos pequeños, como la *pipeta*, la *embudo mágico*, la *botella inagotable*, la *fuente intermitente*, etc.

227. **Pipeta.** — Llámase así un pequeño instrumento, muy usado en los laboratorios y el comercio para tomar un poco de líquido en un recipiente que no se puede ó no se quiere mover.

Fig. 227.

Consiste en un sencillo tubo recto, de vidrio ó de latón, cuya forma es análoga á la de un aréometro que estuviera abierto por sus dos extremos (fig. 227). La extremidad inferior termina en una punta afilada y la superior por un orificio de bordes vueltos.

Introdúcese la pipeta en el líquido por su punta afilada, quedando abierto el orificio superior. El tubo se llena hasta mitad de su vientre, sea por simple comunicación, sea por aspiración en el caso de los líquidos pesados, como el mercurio. Entonces se retira el instrumento del líquido, colocando el dedo sobre el orificio superior. La presión atmosférica, que se ejerce en el orificio inferior, basta para mantener la sustancia en la punta afilada. Pero si se da aire levantando el dedo, la salida ocurre inmediatamente, con velocidad determinada por la fórmula de Bernouilli (223). Basta tapar el orificio para que se detenga: las escasas gotas de líquido que todavía salen bastan para enrarecer el aire confinado encima del líquido, hasta el punto de anular la velocidad de salida, conforme al cálculo precedente[1].

228. **Fuente intermitente.** — *Descripción.* — La *fuente intermitente* está formada por un globo de vidrio C (fig. 228) cerrado por un tapón de esmeril y que presenta en su parte inferior dos ó tres conductos estrechos D, por donde se efectúa la salida. Un tubo de cristal abierto en sus extremos penetra por uno de ellos en el globo C y va á terminar por el otro cerca de un orificio practicado en el centro de una cubeta de cobre B, que sostiene todo el aparato.

Funcionamiento. — Lleno el globo C de agua en sus dos terceras partes próximamente, sale de pronto el líquido por los orificios D; pues la presión interior en D es igual á la de la atmósfera, *más* el peso de la columna de agua CD, mientras que exteriormente, en el mismo punto, la presión es igual sólo á la atmosférica. Estas condiciones persisten, mientras el orificio inferior del tubo está abierto,

1. El *embudo mágico*, la *botella inagotable* ó *mágica*, que son más bien juguetes que instrumentos de física, se derivan de la *pipeta*. Puede verse su descripción en el *Monde physique* de Guillaumin, t. I.

pues por efecto de esta comunicación, la tensión del aire en lo interior es igual á la presión de la atmósfera.

Pero como el orificio deja salir menos agua de la que dan los conductos D, el nivel se eleva poco á poco en la cubeta, y el tubo acaba por penetrar enteramente en el líquido. Ya entonces el aire exterior no puede penetrar en el globo C, y por consiguiente nos encontramos en el caso de una salida en contacto de una masa limitada de aire (226) : el aire se enrarece allí á medida que la salida continúa, y llega un momento en que se establece igualdad entre la presión total interior y la presión exterior. Entonces la salida se detiene ; pero como la cubeta continúa vaciándose, el orificio inferior del tubo no tarda en quedar libre : el aire penetra de nuevo y empieza otra vez la salida.

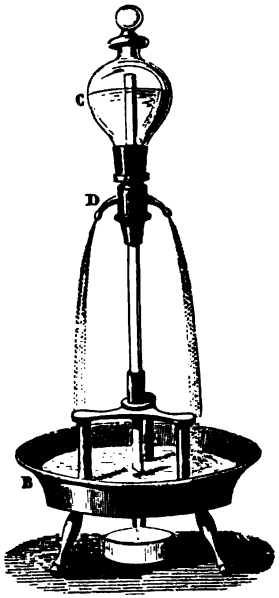


Fig. 228.

229. **Bombas.** — Las bombas son aparatos que sirven para elevar el agua, sea por aspiración, sea por presión, sea por ambos efectos combinados. Clasificaselas en tres categorías :

1.° Las *bombas aspirantes ;*
2.° Las *bombas impelentes ;*
3.° Las *bombas aspirantes é impelentes.*

Los diferentes órganos ó piezas que entran en la construcción de una bomba son : el *cuerpo de bomba*, el *émbolo*, las *válvulas* y los *tubos de aspiración* y *de ascensión.*

El *cuerpo de bomba* es un cilindro hueco y fijo, de metal ó de palo, donde se mueve el *émbolo.* Éste consiste en un cilindro de metal ó de palo, guarnecido de estopa y que se desliza suavemente á lo largo del cuerpo de bomba. Las *válvulas* son discos de metal ó de cuero, que sirven para cerrar alternativamente los orificios que ponen al cuerpo de bomba en comunicación con los *tubos de aspiración* ó de *ascensión.* Por fin, éstos son conductos por donde el agua es primero aspirada hasta el cuerpo de bomba y después impulsada debajo y delante del émbolo, para hacerla salir al exterior.

Válvulas. — Las válvulas empleadas con más frecuencia son la de *bonete* (fig. 229) y la *cónica* (fig. 230). La primera es un disco metálico fijo por medio de una visagra en el borde del orificio que debe cerrar. Para que la cerradura sea más completa, la cara interior del disco está cubierta de cuero grueso.

Cuanto á la válvula cónica, consiste en un tope metálico de esta

forma que penetra en una abertura análoga. Debajo hay una abrazadera de hierro por donde pasa un vástago de cabeza unido con la válvula. Así se logra que el agua levante la válvula y pase sin volcarla.

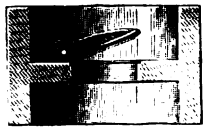


Fig. 229.

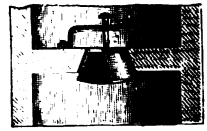


Fig. 230.

Observación. — Para facilitar el funcionamiento hay mucho interés en que la sección de la válvula y la del orificio *tengan las mayores dimensiones* posibles. De esta manera se suavizan los rozamientos del agua con los orificios por donde pasa.

230. **Bombas aspirantes.** — *Descripción.* — Todos los aparatos de esta clase se componen esencialmente: 1°. de un cuerpo de bomba cilíndrico, que lleva en su parte superior un conducto lateral por donde sale el agua, y taladrado en su base por un *ancho* agujero tapado por una válvula de bonete S, que se abre de abajo arriba (fig. 231); 2.° de un tubo de aspiración A, adaptado por una parte al cuerpo de bomba y que por la otra extremidad penetra en el líquido que se trata se elevar; 3°. de un émbolo P sostenido por una varilla á que se imprime un movimiento de vaivén por medio de un guimbalete B. El émbolo tiene en su centro un agujero *ancho*, cerrado por una válvula de bonete O, que se abre de abajo arriba.

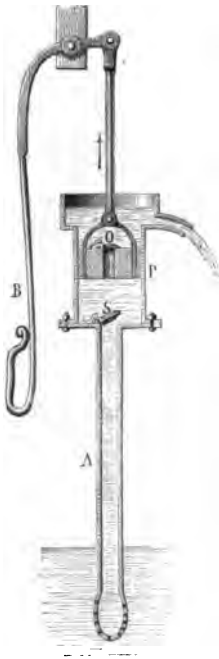


Fig. 231.

Funcionamiento y teoría. — Supongamos que el émbolo esté para empezar en lo más bajo de su camino. Cuando se le eleva, tiende á hacerse debajo el vacío, y la válvula O permanece cerrada en virtud de la presión atmosférica, mientras que el aire del tubo A levanta la válvula S en virtud de su elasticidad y penetra parcialmente dentro del cuerpo de bomba. Enrarecido el aire de esta manera, el agua debe subir evidentemente en el tubo *hasta que la presión de la columna líquida elevada, añadida á la tensión del aire restante en el tubo, equilibre á la presión atmosférica que se ejerce sobre el agua del pozo.* Al bajar el émbolo, la válvula S se cierra por su propio peso,

y se opone al regreso del aire al tubo de aspiración. El aire comprimido por el émbolo levanta la válvula O y se pierde en la atmósfera. Al segundo golpe de émbolo se reproduce la misma serie de fenómenos y al cabo de unos cuantos penetra por fin el agua en el cuerpo de bomba. Entonces se dice que ésta se encuentra *cargada*.

Á partir de este momento, cambia el funcionamiento del aparato: durante el descenso del émbolo, la válvula S se cierra, el agua comprimida levanta la válvula O y penetra encima del émbolo, que la levanta después, llevándola hasta el *tubo de salida*. Ya entonces no queda aire ninguno en el cuerpo de bomba ni en el tubo de aspiración y el agua sigue al émbolo en su camino, obedeciendo á la presión atmosférica.

Altura máxima del tubo de aspiración: cálculo aproximado.— Se ha visto que la presión atmosférica no puede sostener más que el peso de una columna de agua de 10, 33 m.: luego el tubo de aspiración no puede pasar una altura límite de 10, 33 m. sobre el nivel del agua en el pozo, pues en el caso contrario *la bomba de descargaría*. En la práctica dista mucho de alcanzar este máximum la altura del tubo de aspiración. Esto depende de que debajo del émbolo se producen entradas de aire que se agregan á la columna de agua levantada para equilibrar la presión exterior. Además, el émbolo no se aplica nunca exactamente sobre la base del cuerpo de bomba, y cuando está en lo más bajo de su camino existe todavía debajo de él un *espacio perjudicial* lleno de aire á la presión atmosférica. Así es que en general el tubo de aspiración no tiene más de ocho metros.

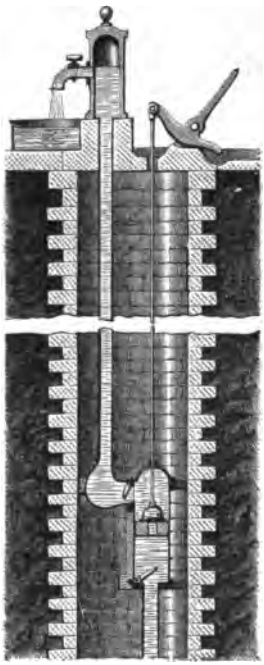


Fig. 232.

231. Bomba aspirante y elevadora. — De modo que el agua es elevada primeramente por la presión atmosférica en el tubo de aspiración de la bomba aspirante hasta una altura que no podría pasar de 8 á 9 metros. Pero una vez que el agua está por encima del émbolo, lo que la hace subir es la fuerza ascensional de éste, y entonces el punto á donde puede llegar depende sólo del esfuerzo aplicado al émbolo, sea cual fuere la altura del *tubo de derrame*. Cuando la bomba está dispuesta para elevar el agua á gran altura, se la llama *bomba aspirante y elevadora* (fig. 232).

232. **Esfuerzo y trabajo necesarios para manejar la bomba aspirante.** — Es posible calcularlos *á partir del momento en que está cargada.* Son muy diferentes durante el descenso y la ascensión del émbolo.

1°. *Descenso del émbolo.* — Durante este período, la presión es sensiblemente la misma sobre las dos caras del émbolo y sus efectos se compensan. Todo el esfuerzo de la maniobra se emplea, pues, en vencer los rozamientos. Por esto importa atenuar en cuanto es posible los del líquido con las paredes de la abertura del émbolo, dando á éste el *máximum de anchura.*

2°. *Ascensión del émbolo.* — En este caso las presiones p y p' que se ejercen sobre las dos caras son notablemente distintas; hay que desarrollar por tanto un esfuerzo capaz de vencer la diferencia $p - p'$.

Sean S la sección del émbolo (fig. 231), e su grueso, H la altura de la columna de agua capaz de equilibrar la presión atmosférica, z la altura variable del émbolo sobre el nivel del pozo, y h la altura constante del orificio de salida sobre el mismo nivel; por fin D la densidad del líquido (que ordinariamente es agua). La presión p, de *arriba abajo*, sobre la cara superior del émbolo es evidentemente igual á la presión atmosférica (que se puede representar por SHD) aumentada con el peso de la columna de agua levantada. Tiénese pues

$$p = \mathrm{SHD} + \mathrm{S}\,(h - z - e)\,\mathrm{D}.$$

La presión p, de *abajo arriba*, sobre la cara inferior, es análogamente

$$p' = \mathrm{SHD} - \mathrm{S}z\mathrm{D}.$$

La diferencia, que mide el *esfuerzo* necesario, es

$$f = p - p' = \mathrm{SD}\,(h - e).$$

ó bien, desdeñando el grueso e del émbolo relativamente á la distancia total del derramador,

$$f = \mathrm{S}h\mathrm{D}.$$

Tal es *el esfuerzo necesario* durante la maniobra: se ve que es idéntico en todos los puntos del camino del émbolo y que no depende sino de las dimensiones del aparato, así como de la densidad del líquido.

Cuanto al trabajo, es igual por definición al producto del esfuerzo f por el camino que recorre su punto de aplicación, esto es por la longitud del camino del émbolo. Tiénese, pues, llamando l á la longitud del cuerpo de bomba,

$$\mathrm{T} = f\,l = \mathrm{S}l\mathrm{D}h.$$

Interpretación del trabajo gastado. — Observemos que el producto S l D representa el peso de un cilindro del líquido, igual á la capacidad del cuerpo de bomba (hasta el orificio de salida) quiere decir al que la bomba arroja en cada golpe del émbolo. Por otra parte, h representa la distancia vertical que existe entre el nivel del pozo y el lugar donde se recoge el agua de la bomba. El producto SlDh representa pues el trabajo que se invertiría en subir directamente el peso de agua que arroja la bomba á cada golpe. De consiguiente, la bomba de agua *no crea trabajo;* hace lo mismo que todas las máquinas, *transformar* el trabajo, permitiendo su producción en condiciones de mayor comodidad y rapidez.

233. **Bomba aspirante de volante.** — Para hacer más rápido y fácil su manejo se pone en algunas bombas un volante de manubrio, en vez del balancín. Este es un perfeccionamiento mecánico análogo al introducido por Bianchi en la manipulación de la antigua máquina neumática de dos cuerpos de bomba.

234. **Bombas impelentes.** — En las bombas impelentes no se utiliza la presión atmosférica sino que se hace subir el agua por la presión directa de un émbolo *macizo.*

El tipo ordinario de bomba impelente es el que la figura 233 re-

presenta en sección. Se distingue de la anterior en que su émbolo es macizo y en que no tiene tubo de aspiración: el cuerpo de bomba penetra en el agua misma que se trata de elevar; por fin, en un lado de este cuerpo hay adaptado en tubo D que es el *tubo de elevación*. En la parte inferior del mismo hay una válvula O, que se abre de abajo arriba, y en la base del cuerpo de bomba otra análoga S.

Cuando el émbolo sube, ábrese la válvula S, levantada por el empuje del líquido, y se llena el cuerpo de bomba. Después, cuando el émbolo baja, la válvula S permanece cerrada y el agua,

Fig. 233.

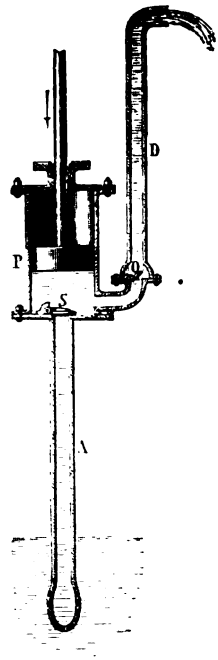


Fig. 234.

impulsada por el émbolo, levanta la válvula O y sube por el tubo D hasta una altura que sólo depende de la presión ejercida por el émbolo y de la solidez del aparato.

Cálculo del trabajo. — El esfuerzo necesario para manejar el émbolo se calcula como anteriormente. Aquí no hay esfuerzo ninguno que desarrollar durante la ascensión del émbolo, pues entonces son sensiblemente análogas las presiones sobre las dos caras. Pero durante el descenso la presión sobre la cara superior no es sino SHD, mientras que sobre la cara inferior es (SHD + S*h*D), llamando *h* á la altura del orificio de salida sobre la base del cuerpo de bomba. El esfuerzo que se necesita desarrollar es por tanto de S*h*D, y el trabajo que ha de gastarse S*h*D. *l* ó bien S*l*D. *h* ó P*h*, representando por P el peso de agua (S*l*D) expulsado á cada golpe de émbolo: conclusión análoga á la precedente (232).

235. **Bombas aspirantes é impelentes.** — La bomba aspirante é im-

pelente eleva el agua por aspiración y compresión al mismo tiempo.

En el tipo usual (sección, fig. 234), el émbolo es macizo, y la base del cuerpo de bomba está provista de una válvula que se abre de abajo arriba y cierra un tubo de aspiración A. En un lado del cuerpo de bomba hay un tubo de ascensión con su válvula O. Cuando la bomba funciona, el agua es aspirada por el tubo A cada vez que el émbolo sube, é impulsada después por el tubo D cuando baja. La teoría de estos aparatos es una consecuencia de las de los dos sistemas precedentes.

236. **Bombas oscilantes. — Bomba de Bramah.** — Para facilitar la maniobra disminuyendo los rozamientos se ha suprimido el émbolo macizo en algunas bombas llamadas *oscilantes*, nombre que deben á su órgano principal, una pieza metálica *que oscila* alrededor de un eje, de modo que desempeñe el papel del émbolo de una bomba ordinaria, aspirante é impelente.

La figura 235 representa en sección la bomba oscilante de Bramah. La pieza móvil es DD', que puede oscilar alrededor del eje O' siéndole comunicado este movimiento por medio de una especie de biela que va á unirse con un manubrio *Om*. Los tubos de aspiración y de derrame se encuentran dispuestos como en la bomba aspirante é impelente ordinaria : la salida se efectúa por arriba y la aspiración por abajo. El cuerpo de bomba está dividido en dos partes por un tabique vertical ; cada una de esas partes puede comunicar alternativamente con el tubo de aspiración y después con el de derrame, por el juego de dos pares de válvulas, *a* y *a'*, D y D; éstas se encuentran adaptadas en la pieza móvil misma y las otras están colocadas en el fondo del cuerpo de bomba. En su posición actual (fig. 235), la pieza móvil aspira el agua en el compartimiento A y la arroja del A' ; lo contrario ocurriría en la posición simétrica de la pieza móvil.

237. **Bombas de salida continua.** — En los aparatos precedentes no es continua la salida, pues se interrumpe, ya cuando baja el émbolo en las bombas aspirantes, ya cuando sube en las impelentes, ya por fin en los *puntos muertos*, quiere decir en los de parada del émbolo tratándose de bombas aspirantes é impelentes. Desde hace mucho tiempo se procura obtener la salida continua, y esto se ha logrado de dos modos :

1.° Por la disposición de la *bomba de doble efecto;*

2.° Por el depósito de aire de la *bomba de incendios.*

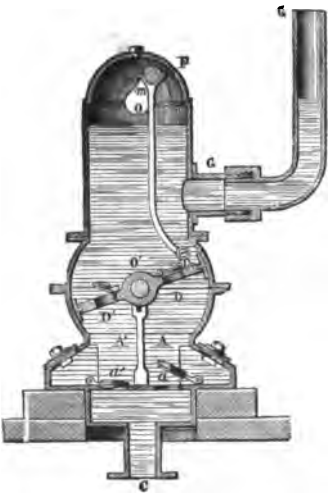


Fig. 235.

1°. *Bomba de doble efecto.* — Esta es una bomba aspirante é impelente, cuyos dos tubos, el de aspiración y el de derrame se subdividen respectivamente en dos ramas (fig. 236), que llegan al cuerpo de bomba por dos orificios provistos de válvulas A, A' y B, B'. Supongamos que en su posición actual esté el émbolo en disposición de subir : la aspiración se produce por el orificio A, mientras que

la válvula A' es cerrada por la columna de agua que el émbolo levanta; al mismo tiempo se produce la impulsión del agua por el orificio B', mientras que la válvula B permanece cerrada bajo la presión del agua contenida en el tubo de derrame. Al contrario, durante el descenso, la aspiración se efectúa en A' y la impulsión en B'.

De modo que el chorro es *casi continuo;* pero el manejo del émbolo exige por necesidad doble esfuerzo.

2°. *Bomba de incendios.* — La bomba de incendios es una bomba impelente en que se obtienen la regularidad y la continuidad de la salida por dos medios: 1°. por la reacción de una masa de aire comprimida en un depósito especial; 2°. por el juego alternado de dos bombas impelentes reunidas *m* y *n* (fig. 237), que son puestas en movimiento por un mismo balancin PQ, que pueden manejar ocho hombres al mismo tiempo. Estas bombas están sumergidas en una caja ó artesa MN, que se mantiene llena de agua mientras funciona el aparato. Según la disposición de las válvulas, se ve que cuando una de las bombas aspira el agua de la artesa, la otra la impulsa á un compartimiento R que se llama el *depósito de aire;* desde allí la reacción del gas la impulsará hacia un orificio Z, y al largo tubo de cuero que se dirige sobre el foco del incendio.

Como la velocidad del agua cuando entra en este depósito es mayor que al salir, su nivel se eleva por encima del orificio Z y el aire que llena el depósito queda comprimido. Por consiguiente, cada vez que se paran los émbolos, el aire comprimido actúa sobre

Fig. 236.

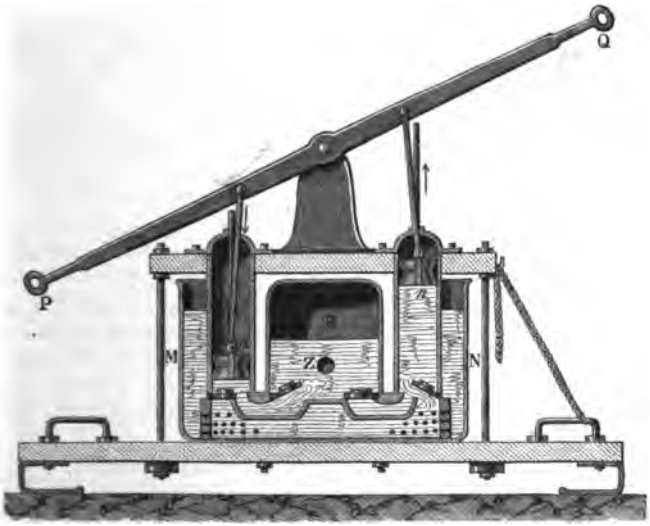


Fig. 237.

el líquido y lo obliga á salir de manera continua, hasta que los émbolos recobran su movimiento.

Bomba de vapor. — Esta bomba de incendio puede disponerse de modo que el juego de los émbolos sea efectuado por un pequeño motor de vapor. Ordinariamente se la dota de una caldera sistema Field, que produce en 8 minutos el vapor de agua necesario al trabajo de la bomba, caldera bastante poderosa para suministrar 900 litros de agua por minuto y lanzar un chorro de 43 metros de altura.

238. **Máquinas elevadoras ó máquinas de agotamiento.** — Cuando se trata, no ya de trabajos domésticos sino de grandes empresas industriales, como el agotamiento de las minas ó de los lagos, los modelos de bombas que hemos descrito serían en extremo insuficientes. Entonces se emplean *máquinas elevadoras* ó de *agotamiento*, verdaderas máquinas movidas, no ya á brazo, sino por el agua, el viento ó el vapor, ó que se ponen á sí mismas en acción automáticamente. Las más usadas se componen de cierto número de bombas aspirantes é impelentes convenientemente reunidas. Cada una de estas bombas debe presentar gran solidez de órganos, por causa de las presiones y resistencias considerables que están destinadas á experimentar. Su émbolo es ordinariamente un gran cilindro macizo, análogo al de las prensas hidráulicas, y que se llama *émbolo de inmersión*.

Máquina de Marly. — Así era la famosa *máquina de Marly*, construida en tiempos de Luis XIV para elevar el agua del Sena hasta los palacios reales de Marly y de Versalles. Componíase de 221 bombas reunidas, que eran movidas por 14 ruedas hidráulicas colocadas en un punto del mismo río donde la rapidez de la corriente suministraba la velocidad y trabajo necesarios. Hoy la nueva máquina de Marly se compone únicamente de 25 bombas, movidas por 5 ruedas hidráulicas, y da una cantidad de agua mucho mayor que la antigua.

Máquina de Fontainebleau. — Una máquina del mismo género, instalada á unos cien metros del Sena, alimenta de agua la ciudad de Fontainebleau; pero el vapor es en este caso el motor.

Hay otras máquinas de agotamiento (máquina de Schemnitz), que funcionan con mayor lentitud, pero *de manera automática*. Fúndanse en principio completamente distinto del de las bombas.

239. **Fuente de Herón.** — Este aparato [1] se compone de dos depósitos de vidrio M y N (fig. 238) unidos entre sí por medio de tubos rectos de cobre A y B. El depósito superior está coronado por una cubeta de cobre D, y el conjunto tiene por peana un trípode. La cubeta se halla en comunicación con la parte inferior del globo N por el largo tubo B, mientras que el tubo A pone en comunicación los dos globos uno con otro. Por fin, un tercer tubo más pequeño atraviesa el fondo de la cubeta y se dirige á la parte inferior del globo M. Este último tubo puede retirarse á voluntad: así se hace para introducir cierta cantidad de agua en el globo M, y después se le vuelve á colocar y se echa agua en la cubeta. El líquido baja por el tubo B al globo inferior y expulsa al aire, que va á acumularse en el superior; este aire así comprimido actúa sobre el agua y la hace salir por el tubo central, á que se añade un gollete metálico. El líquido debería subir por encima del nivel en M hasta una altura igual á la diferencia de nivel en los dos globos; pero el chorro se reduce á mucho menos, por causa de la resistencia del aire y del rozamiento del agua contra los tubos.

La fuente de Herón puede tener también otras formas.

240. **Máquina de Schemnitz.** — Este aparato ha sido construido en Schemnitz (Hungría) para el agotamiento de las minas; funciona automáticamente, como una fuente de Herón (fig. 239). Al nivel del orificio del pozo de la mina está

1. Se atribuye su invento á Herón de Alejandría, 120 años antes de J. C.

situado un primer depósito R (correspondiente al vaso N de la fig. 238): ese depósito recibe una corriente de agua procedente de una cascada H, que se eleva sobre el suelo una altura *h* superior á la profundidad del pozo; ahí se efectúa la compresión del aire que debe servir de motor. Este aire comprimido se dirige por tubos á un segundo depósito R', situado en el fondo del pozo, y donde van á reunirse siguiendo el tubo de llave *r''*, las aguas procedentes de las minas M que se trata de agotar (R' corresponde al vaso M). Cuando ha llegado á ser suficiente la tensión del aire, se dilata comprimiendo

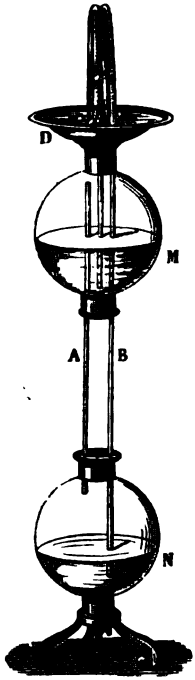


Fig. 238.

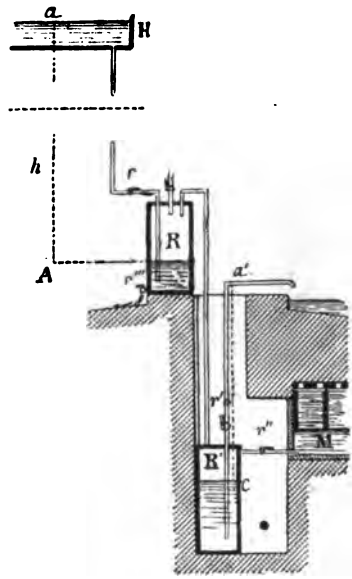


Fig. 239.

el agua y expulsándola por un tubo abductor (*r'a'* correspondiente al vertical de gollete en la cubeta superior de la figura 238). Unas llaves colocadas en puntos convenientes *r*, *r'*, *r''*, *r'''*, permiten arreglar la marcha de la máquina, cerrando y abriendo sucesivamente los depósitos de agua y de aire comprimido.

Observación. — Se ve que el aparato funciona automáticamente por la intervención del aire comprimido. Hubiéramos podido mencionarlo, por consiguiente, al tratar esta cuestión.

241. **Sifones.** — Llámase *sifones* á unos aparatos muy usados en los laboratorios y en la industria, para transvasar líquidos de un recipiente á otro.

El sifón ordinario consiste sencillamente en un tubo encorvado de ramas desiguales (fig. 240).

Funcionamiento. — Para servirse del sifón hay que *cargarlo*, esto es, llenarlo de líquido. Con tal fin se le vuelve y se llena directamente; después se cierran momentáneamente sus dos orificios y se le co-

loca de modo que la rama menor penetre en el líquido que se va á transvasar. Ó bien se pone primero el sifón en su sitio y se aspira con la boca por el orificio B el aire interior: como entonces el vacío se hace en el tubo, el líquido de C lo invade, por efecto de la presión atmosférica, llenándolo completamente.

Cuando el líquido que se transvasa es corrosivo, se usan sifones de tres ramas. Este tercer brazo es ya un tubo lateral M (fig. 241), por donde se aspira el aire teniendo cuidado de cerrar al mismo tiempo el orificio P; ya un tubo

Fig. 240.

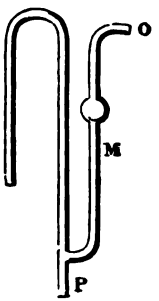


Fig. 241.

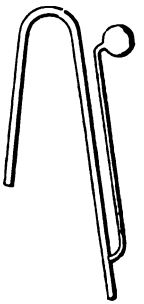


Fig. 242.

soldado en la rama mayor y que termina en un pequeño globo de vidrio (fig. 242). Calentando suavemente este globo, el aire se dilata dentro y sale en cantidad bastante para que el sifón se cargue solo por efecto del enfriamiento y de la diminución de presión que así resulta.

Sea cual fuere el método empleado para cargar el sifón, la salida continúa en dirección de la rama menor á la mayor, mientras está sumergida en el líquido la primera.

Teoría elemental. — Expliquemos por qué ocurre esta salida. De una parte, la fuerza p que oprime al líquido en M (fig. 240) y lo solicita á salir en la dirección CMB, es igual á la presión atmosférica (HD), *menos* el peso (h D) de una columna de agua, cuya altura vertical es DC ($= h$). Por otra parte, existe una fuerza contraria p', que solicita al líquido en la dirección BMC, y que es igual al peso de la atmósfera HD, menos el (h' D) de una columna de agua que tiene como altura vertical A B ($= h'$). Ahora bien, siendo h' mayor que h, resulta que la presión p' es menor que p. Ésta domina, por consiguiente, impulsando la capa del líquido en la dirección CMB, y la salida debe efectuarse en virtud de la diferencia de estas dos fuerzas $f = (h' - h)$ D. Y como el empuje es idéntico en toda la capa líquida situada en un punto cualquiera del sifón, el líquido saldrá en globo, por decirlo así, en un solo pedazo.

La velocidad de salida está determinada por la fórmula de Torricelli $V = \sqrt{2g(h' - h)}$. Por consiguiente, *la velocidad de salida es tanto mayor cuanto más considerable es la diferencia de nivel entre el orificio* B *y la superficie del líquido en el vaso* C.

242. **Teoría completa del sifón.** — Es posible formular la teoría del sifón suponiéndolo colocado en un medio cuya densidad d no sea despreciable relativamente á la densidad D del líquido que se transvasa. Supongamos *cargado* el sifón y consideremos una capa líquida m, situada á un nivel cualquiera en el mismo; sean h y h' las distancias verticales de esta capa á las superficies libres MN y M' N' de los vasos A y A' (fig. 243); por fin, sea ω la presión por unidad de superficie que el medio ambiente, de densidad d, ejerce en el nivel de la superficie libre MN : de los principios fundamentales de la hidrostática resulta que la presión ejercida en el nivel M' N' será superior á ω é igual á $\omega + (h' - h)d$.

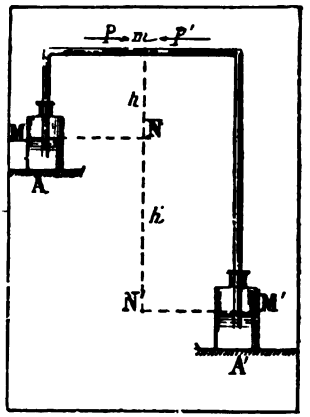


Fig. 243.

Calculemos los empujes p y p' que soporta la rama m, por el lado de cada vaso. Sean s la sección de esta capa y D la densidad del líquido. Tiénese evidentemente $p = \omega s - shD$.

Análogamente se tiene $p' = [\omega + (h' - h)d]s - sh'D$.

Sea f la diferencia de estos dos empujes; resulta

$$f = \omega s - shD - [\omega + (h' - h)\,d]\,s + sh'\,D$$
$$= s\,(h' - h)\,(D - d).$$

Esta fórmula contiene todos los casos particulares que puede presentar el uso de los sifones, en un medio ambiente cualquiera.

1°. d *es depreciable comparado con* D. — Este es el caso ordinario : entonces se tiene $f = s\,(h' - h)\,D$, la carga es $h' - h$, y la velocidad de salida está dada por la fórmula de Torricelli $V = \sqrt{2g\,(h' - h)}$. Se ve que la velocidad es proporcional á la raíz cuadrada de la distancia vertical de los niveles (y no á la diferencia de las ramas) ; será nula cuando el nivel M' N' haya alcanzado el MN por efecto de la salida.

2°. d *no es despreciable, pero sí inferior á* D. — Este es el caso de un líquido que se vierte en un medio fluido, de densidad inferior á la suya. El término $(D - d)$ es positivo, así como la fuerza f. Esto significa que el empuje p es mayor que el p' : la salida se efectúa pues en la dirección del vaso superior al inferior, con velocidad proporcional á

$$\sqrt{h' - h}.$$

3°. d *es superior á* D. — Este sería el caso de un líquido que corriera dentro de otro líquido más denso. Entonces el término $(D - d)$, y por consiguiente la fuerza f son *negativos*. Esto quiere decir que el empuje p' es superior al empuje p; la salida se efectuará desde el *vaso inferior* A' *al vaso superior* A.

Demostración. — Esta curiosa experiencia puede realizarse uniendo dos vasos A y A', llenos de petróleo, por medio de un sifón, que se cargará en un vaso exterior lleno de agua (fig. 243).

243. **Sifón de salida constante.** — Según lo antedicho, para que la velocidad de salida sea constante, precisa que la distancia vertical de los dos niveles del líquido en ambas ramas sea siempre la misma. Realízase esta condición por medio de un mecanismo muy

sencillo, indicado por Herón de Alejandría. El sifón es mantenido en equilibrio gracias á un flotador *a* y un peso *p* (fig. 244), de modo

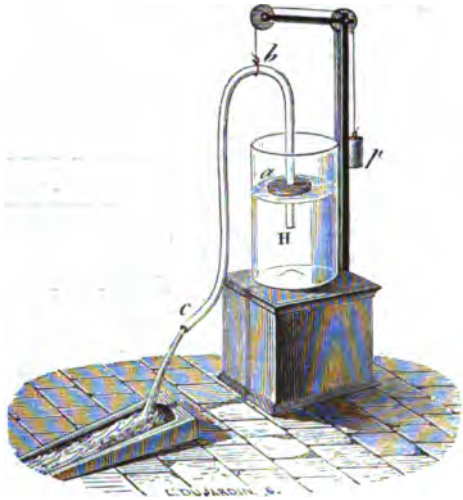


Fig. 244.

que á medida que el nivel baje en el vaso H, el sifón descienda con él : así pues la diferencia entre las alturas *ab* y *bc* permanece invariable y en consecuencia es constante la velocidad de salida.

244. **Sifón intermitente** ó **vaso de Tántalo.** — El *sifón intermitente* da origen á una salida no continua, según indica su nombre. Este sifón está dispuesto en un vaso de manera que la rama más corta se abre cerca del fondo, mientras que la mayor atraviesa este fondo y va á desembocar fuera (fig. 245). Como el vaso es alimentado por un manantial de agua constante, el nivel va elevándose allí poco á poco y al mismo tiempo en la rama menor, hasta el vértice del sifón. Éste se carga entonces por efecto de la presión del líquido, con lo cual se produce la salida. Si el aparato está dispuesto de manera que el líquido derramado por el sifón sea mayor que el vertido por el tubo de alimentación, el nivel baja en el vaso, y no tarda en salir del líquido la rama menor : entonces el sifón *se descarga* y la salida se interrumpe. Pero como el vaso sigue siendo alimentado por el

Fig. 245.

manantial constante, el nivel vuelve á elevarse y así se renueva periódicamente la misma serie de fenómenos.

245. — **Fuentes intermitentes naturales.** — Este es un fenómeno natural que se observa en distintos países. Hay algunas fuentes de esta clase que, después de haber suministrado agua durante algunos días ó de varios meses, se paran de repente por intervalo más ó menos largo, para volver á manar al cabo de cierto tiempo. Hay otras en que estos períodos sucesivos de salida y descanso se repiten varias veces por hora. Puede explicarse fácilmente tan singular fenó-

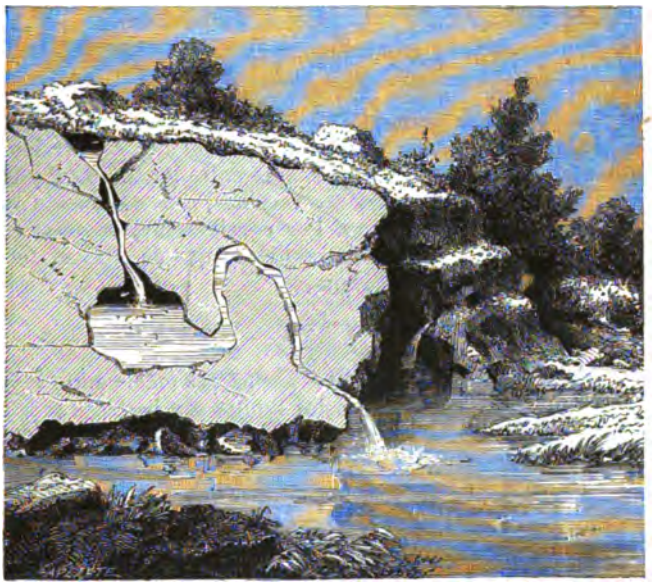


Fig. 246.

meno, comparando la fuente á una especie de vaso de Tántalo de grandes dimensiones, constituido por una serie de cavidades y conductos subterráneos (fig. 246). El depósito de líquido se llena, más ó menos de prisa, con las aguas que acarrean las fuentes cercanas, y empieza á vaciarse así que el sifón natural, formado por las grietas del suelo, está cargado. La salida se para cuando el sifón se descarga por efecto de la entrada del aire, y continúa desde que la carga se restablece por la llegada de las aguas exteriores.

CAPÍTULO II

COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS.

246. **Coeficiente de compresibilidad.** — Después de la experiencia de los académicos de Florencia, se consideró mucho tiempo como

incompresibles á los líquidos. Cantón hizo ver en 1761 que eran sin embargo compresibles y el hecho fué primero comprobado por Perkins y admitido en adelante. Varios físicos han estudiado esta compresibilidad, primero Œrsted, Colladon y Sturm, luego Regnault, Grassi y Cailletet y recientemente Amagat.

Sean V y V' los volúmenes de un líquido bajo las presiones P y P'; la disminución de volumen V — V' puede ser calculada en función del aumento de presión por la ecuación

$$V - V' = KV(P' - P), \qquad \text{de donde} \qquad K = \frac{1}{V}\frac{V - V'}{P' - P}.$$

K es el *coeficiente de compresibilidad*, ó sea la variación que sufriría la unidad de volumen al ocurrir un aumento de presión de una atmósfera, suponiendo á K constante entre los límites P y P'.

En realidad, según más adelante veremos, este coeficiente varía con la presión y la temperatura. Por consiguiente, en estas ecuaciones y en la que de ellas se deduce luego,

$$V' = V[1 - K(P' - P)],$$

K es el coeficiente medio entre P y P'; si estos límites son bastante próximos unos á otros, podrá decirse que aquél es el coeficiente bajo la presión P_1, término medio entre P y P'.

Fig. 247.

247. **Piezómetro y experiencias de Œrsted.** — Œrsted estudió la compresibilidad de los líquidos con ayuda del *piezómetro* [1]. Este aparato se compone de un cilindro de vidrio muy grueso (fig. 247), sostenido por su base en una peana de cobre y arriba en una armadura de cobre también. Ésta presenta un embudo de llave R, que sirve para llenarlo de agua, y un conducto en que se produce la presión mediante un émbolo á que da movimiento el tornillo P. El líquido que se trata de estudiar está contenido en un depósito de vidrio A que termina en un tubo O, encorvado y graduado, que penetra en un baño de mercurio. Cuando se ejerce presión, el mercurio se eleva en el tubo, lo que permite apreciar la disminución de vo-

1. De πιέζειν, apretar, y μέτρον, medida.

lumen. Junto al depósito A está un tubo vertical B, que lleva al lado una escala; este tubo se llena previamente de aire y penetra también en el mercurio. Durante la compresión este aire se reduce de volumen é indica de esta manera el grado obtenido : viene á ser una especie de manómetro de aire comprimido. Como los líquidos se calientan por compresión, precisa esperar, antes de cada lectura, que la temperatura, dada por un termómetro que no se ve en el grabado, haya recobrado su valor inicial.

Contra lo creído por Œrsted, hay que tener en cuenta la variación de volumen del depósito que contiene el líquido : hoy se sabe que se contrae ligeramente. Esta corrección ha dado origen durante mucho tiempo á incertidumbres y errores que hacen difícil la comparación de los resultados obtenidos. Es posible darse cuenta de lo que decimos con sólo examinar el cuadro siguiente, que da el valor de K según diversos experimentadores :

	COEFICIENTES DE COMPRESIBILIDAD PARA PRESIONES					
	QUE NO PASAN DE UNA DECENA DE ATMÓSFERAS				ENTRE 1 Y 100 ATMÓSFERAS	
	Grassi (Método de Régnault)		*Jamin*		*Amagat*	
	Temp.	0,000	Temp.	0,000	Temp.	0,000
Mercurio. . . .	0°	0029	15°	00187	15°	0039 (1 á 50 atm.)
— (Regnault) .	. .	0036	.	. . .	.	. . .
Éter ordinario. . .	0°	1110	0°	1090	0°	1390
Alcohol metílico. .	13°	0913	.	. . .	0°	0939
— etílico . .	7°	0881	0°	0835	0°	0929
— propílico .	. .	. .	.	. . .	0°	0808
— alílico . .	. .	. .	. .	. . .	9°	0820
Sulfuro de carbono.	. .	. .	14°	0625	0°	0720 (200 atm.)
Cloroformo	12°	0648	Acetona		0°	0949
Agua.	0°	0503	Cloruro de etilo.		0°	1270
Agua de mar. . .	17°	0436	Bromuro. . . .		10°	1095
SO^3, 2HO	14°	0242	Yoduro		10°	0887
SO^3, 10HO. . . .	14°	0315	Cloruro de fósforo. . .		10°	0818

248. **Leyes de la compresibilidad de los líquidos.** — *Experiencias de Amagat.* — Amagat estudió la compresibilidad de los líquidos en límites muy extensos de temperatura y de presión.

Aparato. — La figura 248 representa uno de estos aparatos, el que le sirvió para operar entre 0 y 50° y bajo presiones de más de 3000 atmósferas. Se parece un tanto al de Œrsted. Aquí el cilindro de vidrio está reemplazado por otro de acero guarnecido con virolas GG' G' de 18 centímetros de diámetro y 1, 20 m. de longitud, colocado en un mango de cobre HH, lleno de hielo ó atravesado por una corriente de agua á temperatura constante. El líquido que se trata de estudiar está contenido en un piezómetro de vidrio que lleva en su parte inferior un

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

pequeño cilindro lleno de mercurio donde entra y que se sumerge á su vez en el mercurio que hay en GG'G'. Cuando se produce la presión, el mercurio sube en el vástago y va á tocar sucesivamente una serie de pequeños hilos de platino soldados lateralmente en este vástago y enlazados por medio de un alambre conductor aislado que sale del aparato por la pieza F; la disposición es tal que un galvanómetro indica exactamente el instante en que el mercurio toca los alambres sucesivos; de esta manera se leen los volúmenes. La presión es originada primero por una bomba que inyecta agua que llega por E; á partir de cierta presión se cierra E y se continúa comprimiendo con el órgano atornillado en la parte superior, y en el cual hay un cilindro de acero P, que impulsado por un tornillo V movido por un cuádruple brazo de palanca T, impulsa delante de sí un casquete de cuero embutido C, que está dibujado aparte.

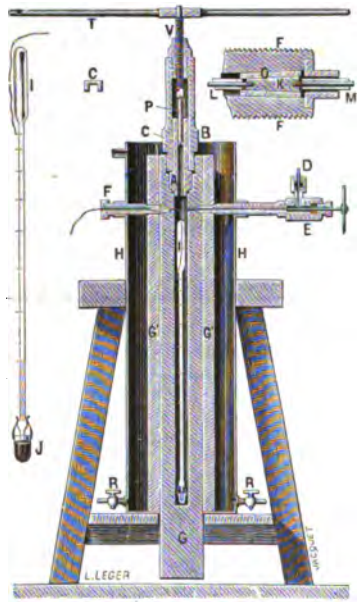


Fig. 218.

Las presiones se median por medio de un manómetro de émbolo libre, que describiremos más adelante, y que comunicaba con el cilindro por medio de un añadido, atornillado al nivel de las piezas E y F, y que no se ha podido representar.

Amagat siguió métodos enteramente distintos para las presiones inferiores y las temperaturas que llegaban á 200°.

El aparato que acabamos de describir y que puede servir como productor de presiones muy elevadas en gran número de experiencias, sirvió también al físico mencionado en sus trabajos sobre los gases (172. 4°); en este caso, lo único que se modificó fué la forma del piezómetro.

Resultados. — 1°. *El coeficiente de compresibilidad de los líquidos disminuye regularmente á medida que la presión aumenta: esta disminución se acentúa tanto más cuanto más elevada es la temperatura, y tanto menos cuanto más considerable es la presión.*

(La variación del coeficiente con la presión había sido hasta estos trabajos objeto de los más contradictorios resultados).

2°. *El coeficiente de compresibilidad de los líquidos (exceptuando el agua) aumenta regularmente cuando la temperatura sube: este aumento es tanto más rápido cuanto más elevada es la temperatura y tanto menos cuanto más considerable es la presión.*

He aquí un cuadro relativo al éter, que pone de manifiesto el conjunto de estas leyes

LÍMITES DE LAS PRESIONES entre	ÉTER (K)					VOLÚMENES DEL AGUA A CERO	
	0°	50°	100°	138°	198°		
atm.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	atm.	
1 y 50	1470	—	—	—	—	1	1,00000
50 — 100	1329	2234	3934	—	—	50	0,99745
100 — 200	1207	1910	3083	—	—	100	0,99493
300 — 400	0986	1392	1939	2558	3925	200	0,99005
500 — 600	0835	1121	1464	1825	2441	300	0,98530
700 — 900	0720	0933	1195	1402	1791	400	0,98071
900 — 1000	0654	0801	0974	1133	1436	500	0,97625
						600	0,97197
1 y 500	1027	—	—	—	—	800	0,96375
500 — 1000	0708	0900	—	—	—	1000	0,95600
1000 — 1500	0537	0658	—	—	—	1500	0,93890
1500 — 2000	0452	0526	—	—	—	2000	0,92370
2000 — 2500	0371	0441	—	—	—	2500	0,91020
2500 — 3000	0317	0366	—	—	—	3000	0,89830

En el cuadro suplementario que expresa el volumen del agua á cero bajo las diversas presiones, se observa que á 3000 atmósferas el volumen de este líquido se reduce en más de $\frac{1}{10}$ de su valor; su densidad con relación á 0° bajo la presión normal es 1,113.

Observación. — Estos resultados se han corregido en la variación del vidrio, cuyo coeficiente de compresibilidad es 0,00000 22, según Amagat; por fin, el coeficiente del mercurio, que presenta interés particular, y para el cual se habían obtenido resultados extremadamente distintos, ha sido estudiado especialmente mediante otros métodos, por el mismo físico, que lo encontró igual á 0,0000039.

CAPÍTULO III

NOCIONES DE CAPILARIDAD.

249. **Fenómenos capilares : definiciones.** — En el contacto de los sólidos con los líquidos entre sí se produce una serie de fenómenos que parecen en contradicción con los principios de la hidrostática. Tales son, por ejemplo, los fenómenos siguientes.

Cuando se sumerge un cuerpo sólido en un líquido que lo moja — por ejemplo una varilla de vidrio bien limpia en el agua, — el líquido se eleva en torno del cuerpo sólido, *como si hubiera dejado de estar sometido á las leyes de la hidrostática*, y su superficie deja de ser horizontal para tomar forma cóncava (fig. 249).

Por el contrario, si el cuerpo sólido sumergido no es mojado por el líquido, — según pasa con el vidrio en contacto del mercurio, — el líquido se deprime en vez de elevarse, y su superficie toma forma convexa alrededor del cuerpo sumergido (fig. 250).

Además, la superficie del líquido afecta la misma curvatura, cóncava ó convexa, junto á las paredes del vaso que lo contiene, según las moje ó no.

Estos fenómenos son más aparentes cuando en vez de una varilla maciza se introducen en el líquido tubos de vidrio huecos de pequeño diámetro. Según que estos tubos son mojados á no, así se produce una ascensión ó una depresión del líquido, tanto mayor cuanto más pequeño es el diámetro (fig. 251 y 252). Además,

Fig. 249.

Fig. 250.

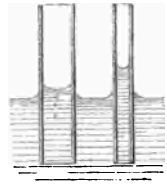


Fig. 251.

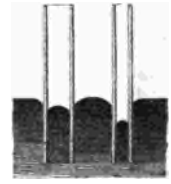


Fig. 252.

cuando los tubos son mojados, la superficie libre del líquido toma en ellos la forma de una curva cóncava, análoga á un segmento esférico : esto es lo que se llama un *menisco cóncavo* (fig. 251); si no son mojados, la columna deprimida termina en una superficie curva convexa, que se llama *menisco convexo* (fig. 252).

Los tubos que sirven para estos experimentos se denominan *capilares*, porque su diámetro interior es bastante fino para ser comparable al de un cabello (*capillus*). Los fenómenos observados ahí se llaman á su vez *fenómenos capilares*, y sirven de tipo á gran número de otros fenómenos análogos, que dependen de la misma causa y que reciben el mismo nombre.

La parte de la física que estudia estos fenómenos se llama *capilaridad*. En otro tiempo se aplicaba también este nombre á la fuerza molecular que se había imaginado para explicarlos.

Según lo que antecede vemos que en los fenómenos fundamentales de la capilaridad hay dos casos muy distintos : el de los líquidos que mojan las paredes sólidas del cuerpo, macizo ó hueco, con que están en contacto, y el de los líquidos que no los mojan. Aquél queda definido por la ascensión del agua y el segundo por la depresión del mercurio en los tubos de vidrio. El primero es el único cuyos fenómenos sean perfectamente claros y cuyas leyes estén probadas de manera rigorosa.

I. — Fenómenos producidos en contacto de los sólidos por los líquidos que los mojan.

250. **Leyes de la ascensión de los líquidos en los tubos capilares.** — 1ª. Ley, ó ley de Jurin. — *Dado un mismo líquido é idéntica temperatura, las alturas medias obtenidas en los diversos tubos capilares se encuentran en razón inversa de los diámetros de estos tubos* (fig. 251).

Llámase *altura media* á la de un cilindro de bases circulares que tuviera exactamente el mismo volumen que la columna líquida elevada. Llamando h á esta altura, y $2r$ el diámetro del tubo, la ley de Jurín puede expresarse por la ecuación

[1] $$rh = \text{constante}.$$

2ª. Ley. — *Dado un mismo líquido y la misma temperatura, las alturas medias alcanzadas son independientes de la forma del tubo capilar, por encima y por debajo del menisco, así como de la sustancia de las paredes del tubo y de su grueso.*

La primera parte de esta ley significa que la forma del tubo capilar, por encima, ó por debajo de la región donde se forma el menisco, no interviene en el fenómeno. Las columnas elevadas serían desiguales en peso pero iguales en altura en un tubo ensanchado ó en otro de ancha base, ó en uno enteramente cilíndrico, que tuvieran todos el mismo diámetro en el punto donde el líquido se detiene (fig. 253). El coeficiente r que entra en la fórmula [1] es pues el diámetro que corresponde á la región del menisco.

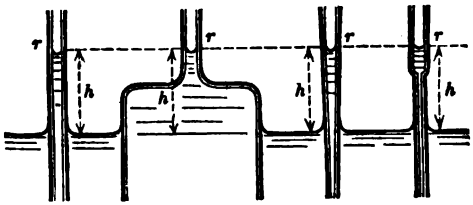


Fig. 253.

3ª. Ley. — *Para diversos líquidos, y á la misma temperatura, las alturas medias alcanzadas en un mismo tubo capilar varían con la naturaleza del líquido.*

Por ejemplo, en un tubo de vidrio de diámetro igual á 1,295 mm., el alcohol de densidad igual á 0,819 sube hasta 9,182 mm; el alcohol de densidad 0,941 hasta 9,997; la esencia de trementina hasta 9,952 mm, etc. (Experimentos de Gay-Lussac).

4ª. Ley. — *Para todos los líquidos, las alturas medias elevadas en un mismo tubo capilar disminuyen (hasta hacerse nulas) cuando la temperatura aumenta.*

Observación. — Al mismo tiempo que las alturas *bajan*, los meniscos *se aplanan*, de manera que á partir de cierta temperatura, que es variable para los diversos líquidos, la superficie capilar se hace plana y horizontal, y su nivel coincide con el exterior.

251. Ley de la ascensión de los líquidos entre dos láminas paralelas. — *Dado un mismo líquido é idéntica temperatura, la altura media elevada entre dos láminas paralelas (fig. 254) es mitad de la altura media que se obtendría en un tubo capilar de diámetro igual á la distancia de las láminas.*

También se puede decir que *la altura obtenida es la misma que en un tubo capilar de radio igual á la distancia de las láminas paralelas.*

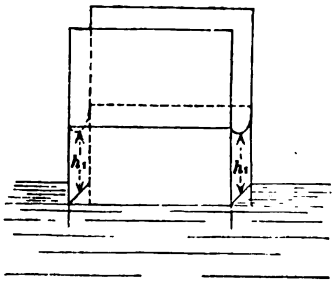


Fig. 254.

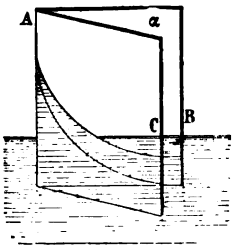


Fig. 255.

El fenómeno de la elevación del agua entre dos láminas de vidrio, paralelas y

suficientemente cercanas una de otra, es tan perceptible como el de la elevación en los tubos capilares y se presta también fácilmente á las medidas de precisión.

252. **Ley de la ascensión de los líquidos entre dos láminas inclinadas.** — *Entre dos láminas inclinadas una sobre otra (un ángulo muy pequeño), sumergidas verticalmente en un líquido que las moja, éste se eleva de manera que su superficie terminal cóncava tiene por sección vertical, en el plano bisector, una hipérbole equilátera.*

Esta ley no se confirma más que en el caso de que el ángulo α de las láminas AB y BC es suficientemente pequeño (fig. 255). Entonces se ve que el líquido se eleva á lo largo de la arista vertical del diedro y que en las caras B y C se dibujan dos curvas análogas á hipérboles equiláteras.

253. — **Demostración de las leyes.** — **Experiencias de Gay-Lussac.** — La mayor parte de las anteriores leyes han sido probadas primeramente *a priori* por Laplace, mediante el análisis matemático. Después las comprobaron experimentalmente diversos científicos, entre otros Gay-Lussac primeramente y mucho tiempo después Eduardo Desains, Frankenheim, Simón (de Metz), Quet, Valson, Wilhelmy, Quincke (de Heidelberg), Van der Mensbrugghe, Wolf, etc.

1°. *Lavado de los tubos capilares.* — Gay-Lussac observó que una de las principales causas de error en las experiencias anteriores era la falta de limpieza de la superficie interior de los tubos. Un velo, por delgado que sea, de una impureza cualquiera, basta para transformar el vidrio en otra sustancia, y para impedir el contacto perfecto del líquido — condición necesaria en la demostración de las leyes. — Así es que antes de servirse de un tubo ó de una lámina de vidrio, el expresado físico los lavaba primero en alcohol y después en los ácidos.

2°. *Manera de llenar los tubos capilares.* — Una vez perfectamente limpios los tubos y completamente secos, Gay-Lussac no los sumergía en los líquidos sin tomar precauciones ; al contrario, aspiraba el líquido y lo hacía subir de esta manera hasta la extremidad superior del tubo. Entonces quedaba adherida á la superficie perfectamente limpia del vidrio ó de cualquier otra sustancia una especie de vaina líquida, por la cual subía ó bajaba el líquido y se fijaba en un nivel determinado, como si fuera en un tubo de su propia materia á que sólo hubiera servido de sostén la parte sólida.

Observación. — Las alturas medias observadas por Gay-Lussac en estas condiciones particulares de limpieza de los tubos eran mucho mayores, dada igualdad de circunstancias, que en los *no preparados*[1].

3°. *Medida de las alturas medias.* — La altura media no es directamente observable, según su misma definición. Compónese primero de la distancia h_1 del nivel general exterior en el punto más bajo del menisco en el tubo, *más* de una corrección ε que es igual á la altura de un cilindro que tenga la misma sección que el tubo y el *mismo volumen* que el menisco líquido (fig. 256). Medíase pues directamente h_1 con el *catetómetro*, calculábase ε, y se tenía $h = h_1 + \varepsilon$.

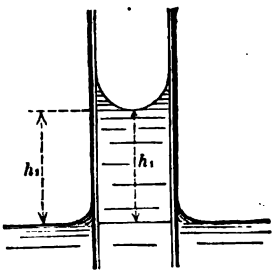


Fig. 256.

4°. *Resultados numéricos.* — Gay-Lussac no efectuó más que reducido número de medidas.

Los resultados relativos al agua (tomada á la temperatura de 8° C.), y al alcohol de densidad = 0,819, demuestran la ley de Jurin : el producto rh es *sensiblemente constante* para cada uno de estos líquidos.

Análogamente, en un mismo tubo (r = 0,064 cm), las alturas obtenidas son distintas para diferentes líquidos (3ª ley). Esta misma ley se comprobó después por las medidas de Frankenheim y de Simon (de Metz), efectuadas con gran número de otros líquidos.

254. **Experiencias de Eduardo Desains.** — Los experimentos de Gay-Lussac fueron continuados por Eduardo Desains, en condiciones más variadas y más precisas todavía.

1. Fueron casi el doble de las que observaron Newton primero y después Haüy en condiciones análogas.

Desains lavaba cuidadosamente, lo mismo que Gay-Lussac, sus tubos capilares, primero con ácidos, después con potasa, y por fin con alcohol y agua. Obtenía la ascensión de los líquidos aspirándolos también. Por fin, medía los diámetros por el método de Gay-Lussac, ó sea por un aforo con mercurio para los tubos más finos y por un aforo con agua si se trataba de tubos más anchos[1]. Pero calculaba las alturas por un procedimiento más preciso que el de Gay-Lussac.

Los resultados de estas medidas confirman la exactitud de la ley de Jurin.

Desains demostró igualmente la ley de la ascensión entre las láminas.

255. **Influencia de la temperatura. — Experiencias de Wolf.** — El efecto de la temperatura es muy superior á lo que pensaba Laplace. Según los experimentos de Eduardo Desains, de Brunner y de Wolf, la disminución de la altura media es mucho más rápida que la de densidad que resulta para un líquido del mismo descenso de temperatura. Así, mientras que en el agua la disminución media de densidad es de 0,00045 próximamente por grado entre 0° y 100°, la disminución media de altura media es unas cuatro veces mayor (0,00182).

Wolf ha llevado mucho más lejos el estudio de esta influencia. Operando en vaso cerrado, ha podido alcanzar y traspasar la temperatura á que el líquido hierve normalmente bajo la presión atmosférica. Trabajó con varios líquidos, el *agua*, el *éter*, el *alcohol*, el *sulfuro de carbono* y el *aceite de nafta*. Obsérvase que estos líquidos bajan rápidamente en los tubos capilares á medida que la temperatura se eleva y que al mismo tiempo se aplana la concavidad de su menisco; acábase por alcanzar una temperatura en que la capilaridad deja de manifestarse, tanto en lo relativo á la ascensión en los tubos como en lo tocante á la curvatura de las superficies terminales. Esta temperatura es variable con los diversos líquidos: sólo llega á 191°,1 con el éter, mientras que pasa de 500° para el agua.

256. **Tensión superficial. — Constante capilar.** — En el estudio experimental de la capilaridad se debe incluir el fenómeno de la *tensión superficial*, que es posible presentar como *un hecho* y probarlo experimentalmente, fuera de toda idea teórica preconcebida.

1°. *Definiciones.* — La superficie libre de un líquido es el lugar de una tracción ó *tensión* tangencial, igual en todas direcciones, y comparable en todos los puntos á la que presentaría una delgada membrana de caucho que envolviera el líquido[2]. De ahí resulta que si se supone cortada normalmente por un plano cualquiera la capa superficial del líquido, existe una *fuerza de reunión* del líquido consigo mismo, que se ejerce en el plano tangente y de modo uniforme en todos los puntos, fuerza que *mantendría unidos* los dos bordes de la sección.

Esta fuerza de reunión es lo que se llama en propiedad la *tensión superficial* del líquido. También se da este nombre á la medida misma de la fuerza, que hay costumbre de expresar *en miligramos* y de referir al *milímetro* de longitud. Igualmente se llama á este coeficiente *constante de cohesión* ó *constante capilar*.

2°. *Demostración experimental directa.* — Es posible probar experimentalmente la existencia de esta tensión superficial. Citaremos algunos de los experimentos directos más concluyentes.

Experiencia de Dupré. — Tómase un vaso cuadrangular llano ABCD (fig. 257), cuya pared metálica CD es móvil en torno de una visagra que coincide con la arista C. Por medio de un hilo atado de E se aplica y se mantiene la pared CD contra un calzo, según la dirección CD_1. Entonces se echa agua hasta los bordes del vaso y, una vez obtenido el equilibrio, se quema bruscamente el hilo D_1 E: entonces se ve que la pared CD_1 vuelve por sí sola á su posición normal CD. Ahora bien, la presión hidrostática tendería, por el contrario, á mantenerla apre-

Fig. 257.

1. Se sirvió de tubos que tenían hasta 4,6 mm. de radio.

2. Esta comparación es muy antigua. Tuvo la primera idea de ella el físico Segner en 1752; y sirvió después á Young para sentar sin cálculos la teoría de los fenómenos capilares.

tada contra el calzo : precisa pues que haya una fuerza de *tracción tangencial* que la lleve á la vertical : este es un efecto de la *tensión superficial.*

Experimento de Van der Mensbrugghe. — Se toma un marco de alambre de hierro de fuerza cualquiera (fig. 258) y se le sumerge en el *líquido glicérico* de Plateau[1]; cuando se le saca, queda encima una lámina líquida plana, que no pasa del marco. Sobre esta lámina se pone con cuidado un bucle hecho de hilo de seda muy fino, empapado en el mismo líquido (fig. 258, I); después se tuerce un

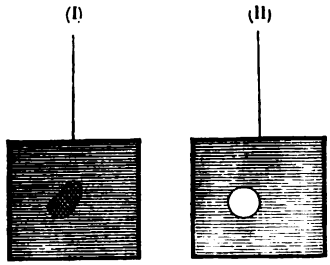


Fig. 258.

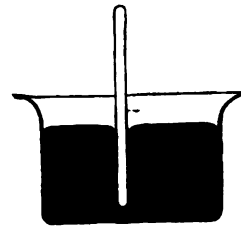


Fig. 259.

pedazo de papel y se atraviesa con él la seda, de modo que desaparezca el líquido interior; inmediatamente se observa que el contorno del bucle se extiende y acaba por formar una circunferencia de círculo (fig. 258, II). Este efecto no puede explicarse más que por la tracción tangencial que el líquido ambiente ejerce de modo uniforme sobre todo el contorno del bucle.

Experiencia de Pasteur. — Un antiguo experimento de Pasteur consiste en introducir verticalmente una varita de vidrio en un baño de mercurio (fig. 259) cuya superficie se ha espolvoreado previamente con asperón reducido á polvo fino. Obsérvase que el polvo desaparece en seguida por el agujero, como si estuviera encima de una membrana que la varilla arrastrara consigo al hundirse. Apenas se retira la varilla, aparecen de nuevo los polvos (al mismo tiempo en cierto modo que esta membrana hipotética) y recobran su posición primitiva.

Esta experiencia sale igualmente bien en un baño de agua espolvoreada con polvos de licopodio. Entonces se unta la varita de vidrio de modo que el líquido no la moje.

257. **Origen de la tensión superficial.. — Cohesión de los líquidos. — Estado de la capa superficial.** — La tensión superficial es evidentemente un efecto de la *cohesión de los líquidos.*

Se ha dado el nombre de fuerzas de *cohesión* á las atractivas que se ejercen entre las moléculas de los cuerpos. Estas fuerzas son muy perceptibles en el caso del estado sólido; ellas son las que se oponen á la ruptura de éstos. Numerosos experimentos prueban que la cohesión existe igualmente, en grado más ó menos alto, sea entre las moléculas de los líquidos, sea entre éstas y las de los cuerpos sólidos y aun de los gases que están en contacto con los líquidos.

Una varita de vidrio, introducida en un líquido que la moja, saca en su extremidad inferior, cuando se la retira del líquido, una gotecilla más ó menos grande. La porción del líquido que se encuentra inmediatamente en contacto con el vidrio es evidentemente retenida por la cohesión del líquido con el vidrio; lo demás de la gotecilla es mantenido por la cohesión del líquido consigo mismo.

Análogamente, una gotecilla de mercurio que, colocada sobre una placa de vidrio que no moja, toma la forma esférica, prueba la cohesión del líquido consigo mismo.

Por fin, el arrastre del aire y de otros gases en las trompas aspirantes por un

1. Este líquido glicérico ha sido preparado por Plateau, á fin de reemplazar ventajosamente el agua de jabón en la producción de las burbujas y en los demás experimentos análogos. Compónese de una mezcla de tres volúmenes de agua de jabón (jabón de Marsella, 25 gramos por litro) bien filtrada con dos volúmenes de glicerina pura.

hilito de agua ó de mercurio, pone de manifiesto la cohesión de estos líquidos por los gases.

Todos los hechos de esta índole prueban por lo demás que estas fuerzas atractivas no se ejercen sino *por contacto*, ó mejor dicho, á distancias tan pequeñas que no caen bajo el dominio de los sentidos : apenas se hace sensible la distancia, queda anulado todo efecto de cohesión. Laplace llama *esfera de actividad molecular* á una que comprende todas las moléculas sobre las cuales puede ejercer acción visible otra molécula central. El radio de esta esfera de actividad representa evidentemente la distancia máxima á que puede dejarse sentir la cohesión : varía con la naturaleza de las sustancias y su estado físico.

Ahora bien, sea un líquido cualquiera en equilibrio : consideremos una molécula *m* situada á una distancia de la superficie libre MN superior al radio de actividad ρ, característico de este líquido (fig. 260, I). Esta molécula no se encuentra sometida más que á las atracciones de las moléculas comprendidas en la esfera de actividad de que es centro : por consiguiente, estas acciones todas, iguales y simétricas, se anulan recíprocamente. Sólo quedan las presiones hidrostáticas que dependen de la profundidad del nivel. Lo mismo ocurrirá con todas las moléculas situadas en la posición (I); para ellas no hay acciones que resulten de la cohesión. Pero esta simetría deja de existir para toda molécula *m'* situada en la posición (II), es decir, á una distancia de la superficie libre inferior al radio de actividad, toda vez que la esfera de actividad es cortada por la superficie libre, y que una posición más ó menos considerable de las moléculas líquidas es reemplazada por moléculas gaseosas de menor cohesión. Luego esta molécula, y todas las que se encuentran en el mismo caso, están sometidas necesariamente á ciertas acciones, muy distintas de las presiones hidrostáticas, y que dependen únicamente de las fuerzas de cohesión. Existe pues para una *capa superficial* (cuyo grueso está definido por el radio de actividad molecular) un estado dinámico especial, de donde resulta evidentemente la *tensión superficial* que la experiencia nos ha revelado.

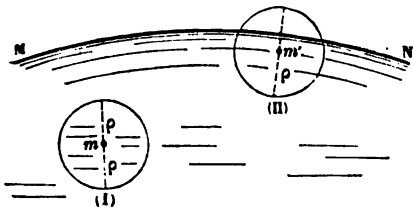


Fig. 260.

Estas componentes tangenciales de la cohesión son las que producen los efectos mecánicos que hemos puesto de manifiesto anteriormente con el nombre de *tensión superficial*.

258. **Consecuencias de la tensión superficial. — Presión capilar. — Fórmula de Laplace.** — La existencia de esta fuerza de tracción, que llamamos tensión superficial y que se ejerce tangencialmente á la superficie del líquido, puede considerarse en consecuencia como demostrada no sólo por la experiencia sino también por el razonamiento. Vamos á deducir de ahí algunas consecuencias, que nos permitirán primero medir experimentalmente el valor de la tensión superficial y después plantear simplemente la teoría de los fenómenos capilares.

Demuéstrase geométricamente que :

1°. Cuando la superficie libre de un líquido es *plana* no resulta del hecho de la tensión superficial ninguna fuerza ó presión vertical ;

2°. Cuando la superficie libre de un líquido es *curva* (convexa ó cóncava), resulta de la tensión superficial que se ejerce allí en cada punto, una fuerza (ó presión vertical) que *se añade* á la presión hidrostática, ó se resta de ella, en la capa superficial, según que la superficie es *convexa* ó *cóncava*.

Esta presión se llama la *presión capilar* en el punto considerado Se expresa por la fórmula de Laplace

$$[1] \qquad N = \pm S\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

en que S es la *constante de cohesión*, definida anteriormente, y R y R' los radios de curvatura principales de la superficie líquida en el punto considerado.

La presión capilar es positiva ó negativa, — quiere decir aditiva ó sustractiva respecto de la gravedad, — según que la superficie libre es convexa ó cóncava, quiere decir, según que el líquido no moje ó moje las paredes del vaso que lo contiene.

259. **Demostración de la fórmula de Laplace. — Experiencias de Plateau.** — La fórmula de Laplace ha sido probada experimentalmente gracias á trabajos muy interesantes que se deben al físico belga Plateau.

Imaginemos, en efecto, que se pueda obtener un líquido *sin peso*, y que se coloque pequeña masa del mismo al abrigo de la atracción molecular de toda pared sólida. La condición de equilibrio de esta masa líquida, es que adquiera una superficie tal que la presión capilar sea ahí normal y uniforme en todos los puntos. Esta condición se expresará por la fórmula de Laplace donde supondremos N = constante. Dividiendo los dos miembros por el coeficiente S (que es una constante para un líquido determinado) se tendrá la ecuación

$$[2] \qquad \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = \text{constante}.$$

Tal es la ecuación general de las superficies exteriores que puede tomar una masa líquida desprovista de peso y libre de toda acción molecular que no sea su propia cohesión. Ahora bien, se sabe en geometría que todas las superficies *de curvatura media constante* satisfacen esta ecuación. Tales son, por ejemplo, la *esfera*, el *plano*, la *superficie lateral de un cilindro circular recto*.

Fig. 261.

Plateau ha podido realizar estas diferentes figuras de equilibrio por medio de pequeñas masas de aceite, suspendidas en una gran masa de agua alcoholizada, *de la misma densidad*. En virtud del principio de Arquímedes, la masa de aceite quedaba de esta manera sustraida á la acción de la gravedad. Las experiencias se efectuaban en un aparato que ha llegado á ser clásico y que consiste en un vaso cúbico cuyas paredes son espejos de caras paralelas (fig. 261). Llénasele primero casi enteramente con agua alcoholizada; y después se introduce allí, valiéndose de una pequeña jeringa de punta afilada y encorvada, una pequeña cantidad de aceite.

Primer experimento. — Primeramente se ve al aceite redondearse como una esfera perfecta (fig. 262, I). Aumentando poco á poco su masa, se puede llevarla hasta un diámetro de 10 centímetros. Esta forma esférica es perfectamente estable y se reproduce espontáneamente desde que se la altera.

Segundo experimento. — Una vez que se ha obtenido esta esfera líquida, es posible, sometiéndola á la acción de la fuerza centrífuga, realizar otra experiencia muy curiosa. Basta para ello con atravesarla, en la dirección de su diámetro vertical, por una varilla muy fina á que se puede imprimir un movimiento más ó menos rápido de rotación sobre sí misma.

Si la velocidad es moderada, la bola se aplana en los polos y toma la forma del esferoide terrestre (fig. 262, II). Cuando la velocidad aumenta, parte de la masa de aceite se desprende en el plano del ecuador y forma en torno del núcleo central, que sigue siendo esférico, un anillo concéntrico, que recuerda el de Saturno (fig. 262, III).

Tercer experimento. — Para obtener otras superficies que satisfagan á la ecuación [2], es necesario obligar á la masa de aceite á pasar por determinadas

piezas sólidas fijas, que en cierto modo sirvan de armaduras ó soportes á la superficie líquida[1].

Observaciones. — 1°. Estas experiencias demuestran indirectamente la exis-

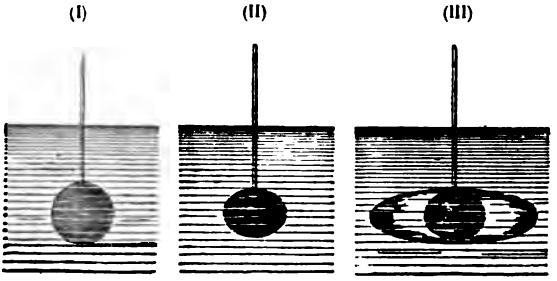


Fig. 262.

tencia de la tensión superficial de los líquidos, probando directamente la fórmula [2] y, por consiguiente, la fórmula [1] deducida de la primera.

Teoría de los fenómenos capilares. — Toda la teoría de la capilaridad puede deducirse de la noción de tensión superficial, y sus leyes todas están contenidas en la fórmula de Laplace.

II. — Fenómenos producidos en contacto de los cuerpos sólidos por los líquidos que no los mojan.

260. **Contacto de los líquidos y de los sólidos. — Ángulo de conjunción.** — Los fenómenos capilares se complican y son menos claros en el caso de que el líquido no moje la sustancia del tubo capilar. Por ejemplo, si en una superficie plana y horizontal bien limpia se vierten algunas gotas de un líquido que no la moje, este líquido (fig. 263) forma generalmente una especie de masa más ó menos redondeada, que se continúa con la superficie sólida por un ángulo determinado $CAS_1 = \omega$, que se llama *ángulo de conjunción*. Este elemento, de que hasta ahora no habíamos tenido que ocuparnos, desempeña papel capital en los fenómenos capilares que nos faltan por estudiar.

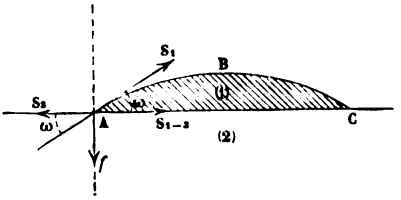


Fig. 263.

261. **Estudio experimental del ángulo de conjunción.** — *Experiencias de Quincke.* — Teóricamente, *el ángulo de conjunción es constante para un mismo cuerpo sólido y un mismo cuerpo líquido.* — Esto resulta de la fórmula que se obtiene calculando el ángulo ω en función de la tensión superficial y de las fuerzas de cohesión.

Una antigua experiencia de Gay-Lussac parecía demostrar esta constancia en el caso del mercurio y del vidrio. Otras más precisas no han conservado ese resultado.

Quincke midió por un procedimiento óptico el ángulo de conjunción de las diversas gotas de mercurio colocadas sobre un mismo plano de vidrio. Además,

1. Plateau obtuvo de esta manera otras varias superficies de revolución, que satisfacen á la ecuación [2]. Todas ellas pertenecen á tres tipos, que dicho físico llama, según la forma de su curva meridiana, la *onduloide*, la *catenoide* (cuya meridiana es una *cadeneta*) y la *nodoide*.

calculaba tres elementos geométricos suficientes para definir su forma : la ordenada máxima *a*, la ordenada del punto extremo de contacto *b*, y por fin la ordenada del borde de la gota *c* (fig. 264). De esta manera observó los hechos siguientes :

1°. Prodúcese en la forma de las gotas cambio continuo, al principio muy rápido durante los primeros minutos que siguen al depósito sobre el vidrio, y que después van haciéndose cada vez más lentos, sin por lo demás cesar en algunas horas y aun en algunos días.

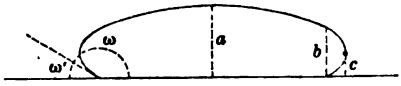


Fig. 264.

2°. Hay análogamente una variación continua en la magnitud del ángulo agudo ω' de conjunción.

Conclusiones. — De estos dos hechos resulta que el equilibrio capilar no es nunca *completo* ni *estable* para una gota de mercurio colocada sobre un plano de vidrio. Numerosas observaciones[1] han demostrado que ocurre lo mismo con columnas de mercurio, ascendentes ó descendentes, en tubos de vidrio, por más que aquí el rozamiento pueda producir un equilibrio aparente, que sólo es momentáneo.

De manera que el ángulo de conjunción *no es constante* entre un mismo líquido y un mismo sólido. Para el vidrio y el mercurio en particular se ha observado que puede variar, *sin razón aparente*, entre 38° y 45°. La variación es *a fortiori* mayor y más brusca cuando hay causa aparente, tal como la sacudida de la lámina ó del tubo sólido, ó bien la interposición de la menor capa de sustancia extraña sobre el líquido y el sólido que están en contacto.

262. Leyes de la depresión de los líquidos en los tubos capilares y entre las caras paralelas. — La teoría de la capilaridad conduce, en el caso de que los líquidos no mojen á los sólidos y sufran una depresión, á las mismas leyes que en el caso de la ascensión. Sólo enunciaremos las dos principales :

Ley de Jurin. — *Dado un mismo líquido y la misma temperatura, las depresiones medias en diversos tubos capilares están en razón inversa de los diámetros de estos tubos.*

Esta ley se expresa, como la análoga de los líquidos que mojan, por la fórmula

$$rh = \text{constante}.$$

Constante que es determinada por la teoría.

Llamando S_1 á la *tensión superficial* propia del líquido, D la densidad y ω el ángulo agudo de conjunción (fig. 264), se tiene

$$rh = \frac{2\,S_1 \cos \omega'}{D}.$$

Se ve, con arreglo á la fórmula misma, que la depresión media *h* es función del ángulo de conjunción.

Ley de las láminas paralelas. — *Dado un mismo líquido y la misma temperatura, la depresión media entre dos láminas paralelas es mitad de la depresión que se produciría en un tubo capilar de diámetro igual á la distancia de las láminas.*

La demostración de estas leyes se ha efectuado, ó se ha intentado por lo menos, para el mercurio y el vidrio. Presenta numerosas dificultades, unas experimentales que ha sido posible vencer, y otras teóricas invencibles.

263. Consecuencias relativas á la corrección barométrica. — Construcción de las tablas de corrección. — Si la ley de Jurin fuera rigurosamente exacta, el error debido á la capilaridad en los tubos barométricos sería fácil de corregir, toda vez que estaría exactamente en razón inversa de los diámetros. Bastaría con hacer una sola observación sobre un vidrio dado para calcular la tabla de corrección correspondiente á toda especie de tubos del mismo vidrio. Pero por causa de la variabilidad del *ángulo de conjunción*, es indispensable hacer intervenir el valor de este ángulo en las tablas de corrección. Así es que todas estas tablas de co-

1. Observaciones de Bravais y experimentos de Quincke.

rrección, desde las más antiguas, que se deben á Bouvard, hasta las más recientes, obra de la señorita Gutkowska, indican para un mismo diámetro de tubo las depresiones correspondientes á diferentes valores posibles del ángulo capilar ω'.

Uso de la flecha del menisco. — En vez de medir el ángulo capilar ω', es más cómodo medir la *flecha* f del menisco. Llámase así á la distancia del punto más elevado del menisco sobre el plano de la línea de conjunción.

En el caso de que el menisco es exactamente circular, estos dos elementos están enlazados entre sí por una fórmula muy sencilla. En efecto, sea una sección del menisco y del tubo por un plano que pasa por el eje (fig. 265); sea r el radio del tubo, que es al mismo tiempo el del círculo menor de la esfera de que el menisco forma parte y sea R el radio de esta esfera.

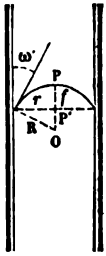


Fig. 265.

Tiénese evidentemente

$$f = OP - OP'$$

con

$$OP = R, \qquad OP' = r \operatorname{sen} \omega' \qquad \text{y} \qquad R = r' \cos \omega'.$$

Sustituyendo estos valores, resulta

$$f = r. \frac{1 - \operatorname{sen} \omega'}{\cos \omega'}.$$

Construcción de las tablas. — Si se admite que el menisco es circular, la depresión media h está relacionada con la flecha y la tensión superficial S_1 por la ecuación

$$h = \frac{D\,(r + f^2)}{4\,S_1 f}.$$

Es posible, por tanto, si se admite un valor constante de S_1, construir una tabla que indique para cada valor del radio r las depresiones correspondientes á los diversos valores posibles de la flecha f.

Dicha tabla convendrá en general para un barómetro cualquiera, porque si bien es cierto que el ángulo ω' varía mucho de un mercurio á otro (de 38° á 46°), en cambio la tensión S_1 varía muy poco (apenas $\frac{1}{20}$ de su valor).

III. — Fenómenos capilares diversos. — Aplicaciones.

264. **Longitud de la columna líquida suspendida en un tubo abierto.** — Cuando se sumerge un tubo capilar en un líquido que lo moja (fig. 266, I), éste sube hasta una altura h determinada por la ley de Jurin, y termina en un menisco cóncavo. Esta altura h es tal que equilibra á la componente normal N de la tensión superficial, determinada por la curvatura del menisco.

Si se retira con precaución el tubo del líquido, no sólo se arrastra con él la columna líquida levantada, sino que ésta es *mayor* que en el caso precedente: puede ser *doble*, quiere decir, igual á $2h$, si el orificio inferior del tubo está tallado en forma de bisel.

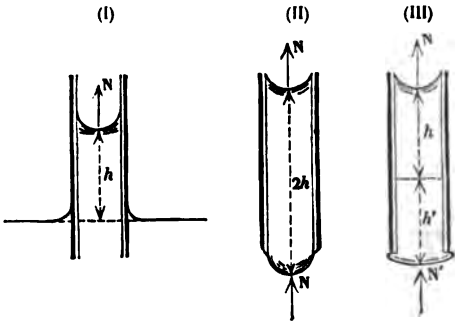


Fig. 266.

Al mismo tiempo, la columna líquida termina por la parte inferior en un menisco *convexo*, de curvatura análoga á la del menisco superior (fig. 266, II).

Este último hecho explica el anterior. En efecto, como el menisco inferior es idéntico al superior, desarrolla lo mismo que él una componente normal, dirigida de arriba abajo, y capaz también de equilibrar una columna h. La columna suspendida debe por consiguiente tener una altura total $2h$.

Por fin, si el orificio inferior termina en bordes planos (fig. 266, III), el menisco inferior que allí se forma corresponde al *diámetro exterior* del tubo y no ya al *interior*, como en el caso del bisel. Este menisco exterior es menos curvo que el precedente, y desarrolla una componente normal $N' < N$: por consiguiente, la columna h' que puede sostener es más pequeña que h. La altura total suspendida es, pues, menor que en el caso precedente, reduciéndose á $h + h'$ ($< 2h$).

265. Formación de las gotas en un orificio capilar. — Ley de Tate. — Teoría del cuenta-gotas. — Hemos dicho que el efecto del menisco inferior, unido al del menisco superior, basta para sostener la columna $h + h'$. Si el inferior estuviera solo, podría hacer equilibrio á una presión h'. Esto explica porqué precisa cierto exceso de presión, cuando un líquido está contenido en un vaso terminado por un orificio estrecho, para hacerle salir por él (por ejemplo un cuenta-gotas, (fig. 267, I). Si esta presión es limitada, como en el experimento anterior, el menisco inferior conserva una forma invariable y la gota se para en su crecimiento. Por el contrario, si la presión interior va aumentando, acaba por triunfar de la resistencia del menisco, la gota se infla progresivamente, como en un pequeño saco elástico cuya tensión disminuye á medida que aumenta su volumen; y al cabo, cuando la gota ha llegado á ser bastante voluminosa para que su peso sea superior á la componente normal de la tensión superficial, entonces se estrecha en la parte superior (fig. 267, II) y acaba por desprenderse, rompiéndose según una circunferencia $o'o'$ que es casi igual á la del orificio oo.

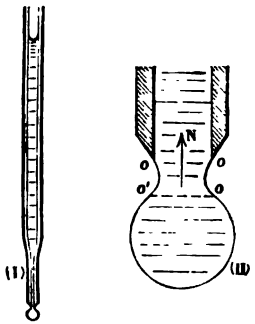


Fig. 267.

Ley de Tate. — Las gotas que se forman de esta manera en el orificio de diversos tubos capilares tienen, dado un mismo líquido, pesos proporcionales á los diámetros de estos tubos.

También se ha demostrado por la experiencia que :

1°. Los pesos de las gotas son independientes de la sustancia sólida que forma el orificio (cuando esa sustancia es perfectamente mojada por el líquido).

2°. Estos pesos disminuyen cuando sube la temperatura.

Dichas leyes prueban que este fenómeno es una consecuencia directa de la tensión superficial que se ejerce á lo largo del círculo de garganta oo', cuyo diámetro puede considerarse como proporcional al del orificio.

Ambas constituyen la teoría del *cuenta-gotas*, pequeño instrumento de vidrio (fig. 267, I), que se usa en terapéutica para obtener una masa determinada de un licor farmacéutico según el número de gotas vertidas. Se comprende, pues, cuánto importa utilizar en farmacia instrumentos que tengan exactamente el mismo diámetro en el orificio.

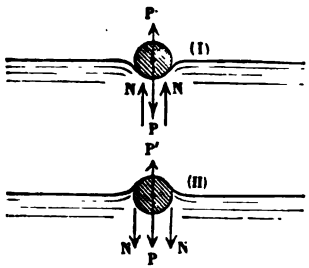


Fig. 268.

266. Excepción á las leyes del equilibrio de los cuerpos flotantes. — Algunas excepciones curiosas al principio del equilibrio de los cuerpos flotantes se explican por efectos de la tensión superficial y se incluyen en la categoría de los fenómenos capilares. Tales son los hechos siguientes :

Agujas metálicas que flotan en el agua. — Una aguja de acero, previamente cubierta por una capa grasa muy delgada y puesta con precaución en la superficie

del agua, *no penetra en ella*, por más que su densidad sea 7 veces 1/2 mayor que la del líquido (fig. 268, I). Al mismo tiempo el agua se deprime mucho en torno suyo. Pero si el líquido llega á mojar la aguja (fig. 268, II), cae inmediatamente al fondo del vaso.

Estos fenómenos se explican fácilmente por el efecto de las componentes normales de la tensión superficial, que se ejercen en N, N, de abajo arriba. En el primer caso, estas componentes se agregan al empuje P' del líquido para equilibrar el peso P de la aguja, de modo que resulte $P = N + P'$.

En el segundo caso, las componentes N se agregan al peso P, de modo que el empuje P' es impotente á equilibrar estas dos fuerzas. Tiénese $P + N > P'$.

Insectos que andan sobre el agua. — La experiencia anterior explica la curiosa facultad que tienen algunos insectos [1] de andar sobre el agua sin sumergirse, no obstante su mayor densidad. Encuéntranse en el caso de la aguja untada de grasa, porque sus patas emiten una secreción aceitosa. Basta en efecto con disolver esta capa grasa, lavando sus patas con éter, para privar á estos animales de su facultad de andar encima del agua.

267. **Movimiento de las gotas en los tubos capilares cónicos.** — Hay que considerar dos casos, según que el líquido moje ó no la sustancia del tubo.

1°. Se introduce una gota de agua en un tubo capilar de vidrio, de forma cónica y dispuesto horizontalmente (fig. 269, I). La gota se extiende formando en sus extremidades dos meniscos cóncavos, desigualmente curvos; la mayor curvatura está vuelta hacia la extremidad estrecha del tubo y la menor hacia el extremo ancho; además en vez de *fijarse* en la posición en que se la ha colocado, *se mueve espontáneamente hacia la punta estrecha.*

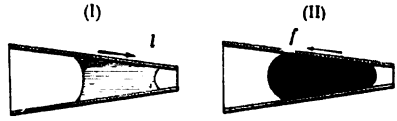


Fig. 269.

2°. Introdúcese una gota de mercurio bien limpia en el mismo tubo ó en un tubo análogo (fig. 269, II). Entonces se observa el fenómeno *inverso*. La gota termina en dos meniscos convexos, y *anda en dirección de la punta ancha del tubo.*

Estos dos hechos son efectos muy sencillos de la tensión superficial. En el primer caso, cada punto del menisco A, el centro en particular, es solicitado por la presión atmosférica H, rebajada en la componente normal N de la tensión. Suponiendo que el menisco sea hemisférico, y llamando R al radio del tubo en este punto, se tiene

$$N = S\frac{2}{R} = \frac{2S}{R}.$$

La fuerza que oprime al menisco en A es pues (por unidad de superficie) $H - \frac{2S}{R}$. Análogamente, la fuerza que impulsa al menisco en B es $H - \frac{2S}{r}$.

La resultante de estas dos fuerzas es

$$f = 2S\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right).$$

Se ve que es *positiva*, puesto que $r > R$: por consiguiente, la gota se dirigirá hacia la parte estrecha del tubo.

En el segundo caso, las dos presiones en A y en B son

$$H + \frac{2S}{R} \quad \text{y} \quad H + \frac{2S}{r}.$$

Su diferencia es $2S\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right)$ y *negativa*. Luego la presión se ejerce desde B hacia A : la gota será impulsada en el sentido de la parte ancha.

1. Como por ejemplo los de patas largas llamados *tejedores*.

268. **Atracciones y repulsiones de los cuerpos flotantes.** — La misma explicación se aplica á los movimientos de atracción ó de repulsión que se observan entre ciertos cuerpos ligeros que flotan en la superficie de los líquidos, ya los mojen ó no.

Dos bolas de corcho que flotan en el agua se atraen bruscamente desde que llegan á estar una cerca de otra. Obsérvase, por otra parte, que el líquido las

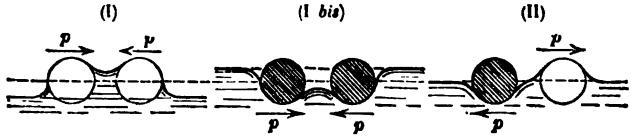


Fig. 270.

moja y sube más alto entre ellas que por fuera (fig. 270, I) : de ahí la explicación de la atracción, como en el experimento precedente.

Dos bolas de corcho untadas con negro de humo ó un cuerpo graso que flotan en el agua (fig. 270, I *bis*), se atraen del mismo modo cuando están suficientemente cerca una de otra. Obsérvase además que el líquido no las moja y que se deprime más entre los dos cuerpos que por la parte exterior : así se explica la atracción.

Por fin, dos bolas de corcho, una ennegrecida y la otra no, que flotan en el agua, *se rechazan* bruscamente (fig. 270, II) apenas llegan á estar una cerca de otra ; y se observa que el líquido se deprime á lo largo de la primera bola *más por fuera que por dentro*, y que á lo largo de la segunda se eleva análogamente *más por fuera que por dentro*.

Observación. — Del mismo modo se explican las atracciones ó las repulsiones ejercidas sobre los cuerpos flotantes, sea por los bordes y paredes de los vasos, sea por otros objetos sumergidos en el líquido, según que éste moje ó no los dos cuerpos en presencia, ó bien que moje al uno y que no moje al otro.

269. — **Experiencia de Lippmann. — Fenómenos electrocapilares.** — Entre los movimientos producidos por la tensión superficial, puede citarse una curiosísima experiencia de Lippmann. Depositase en un platillo una ancha gota de mercurio y encima se echa una capa de agua, acidulada y adicionada con bicromato de potasa ; por fin, en el borde del platillo se fija un alambre de hierro, que penetra en el agua acidulada y va á tocar la superficie exterior del mercurio. Apenas hay contacto, la gota se contrae y abandona al hierro, después recobra su forma inicial llegando á tocar de nuevo el alambre y se contrae otra vez, continuando indefinidamente el mismo fenómeno alterno.

Aquí la capilaridad propiamente dicha se complica con una acción química y otra eléctrica. Hay que servirse de estos tres efectos para explicar el movimiento En contacto del agua acidulada, el mercurio se oxida, su tensión superficial disminuye y la gota se aplana : entonces es cuando toca el alambre. Pero ahora se forma entre el mercurio, el agua acidulada y el hierro un *par voltaico*, cuya corriente reduce el óxido de mercurio, y devuelve á la superficie su limpieza primitiva así como su tensión superficial normal, y la gota se redondea otra vez contrayéndose ; después el óxido se reforma, la tensión superficial disminuye, la gota se aplana otra vez, y así sucesivamente.

Este fenómeno capilar, en que interviene la electricidad, es el tipo de una categoría de otros sumamente curiosos, que reciben el nombre de *fenómenos electrocapilares*. Lippmann ha logrado dar luz á la oscura complejidad de estos hechos, y descubrir la ley que enlaza el estado eléctrico (ó *potencial*) de una superficie con el valor de su tensión superficial. Después aplicó esta ley á la construcción de su *electrómetro capilar*, uno de los instrumentos más ingeniosos y precisos de la física [1].

270. **Aplicación de la capilaridad á los areómetros.** — Todos los areómetros están provistos de vástagos capilares y se sumergen en líquidos que los mojan. De ahí deben resultar necesariamente atracciones que alteran el equilibrio tal como lo

1. Lo describiremos más adelante, en el capítulo consagrado á la Electrometría.

hemos establecido precedentemente, no fijándonos más que en las presiones y los empujes hidrostáticos.

1°. *Errores debidos á la capilaridad.* — Sumergido un areómetro en un líquido que lo moja (fig. 271) éste se eleva en menisco cóncavo alrededor de su vástago y ejerce en toda la circunferencia de conjunción un efecto de tracción debido á la tensión superficial. De modo que esta tracción se agrega al peso del instrumento, para hacerlo hundirse algo más de lo que indica la ecuación de equilibrio hidrostático. Por ejemplo [1], se ha calculado que para un densímetro de 27,220 g de peso, sumergido en el agua ordinaria, el aumento de peso, debido á la tensión superficial, es igual á 0,235 g (próximamente $\frac{1}{100}$ del peso total), y que de ahí resulta un exceso de inmersión de 3 mm : por consiguiente, si la tensión superficial del líquido desapareciera, el aparato subiría 3 mm.

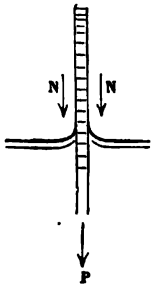


Fig. 271.

En otro líquido donde la tensión superficial fuera inferior á la del agua únicamente en 1/3, el mismo areómetro subiría 1 mm [2].

2°. *Corrección del error capilar.* — Sea r el radio del vástago capilar al nivel de la línea de flote, y N el valor de la componente vertical de la tensión superficial del líquido. La presión que se ejerce en toda la circunferencia de flote tiene por valor $2\pi r N$. La ecuación de equilibrio debe escribirse, pues, de la manera siguiente (P, peso del instrumento ; v, volumen sumergido ; D, densidad del líquido) :

$$[1] \qquad vD = P + 2\pi r N.$$

Si se introduce el mismo instrumento en otro líquido, de densidad D' y de tensión superficial diferente, el volumen sumergido pasará á ser v', y la ecuación de equilibrio se convierte en

$$[2] \qquad v'D' = P + 2\pi r N'.$$

Dividiendo estas dos ecuaciones miembro á miembro, y aislando el cociente $\frac{D}{D'}$, tenemos

$$[3] \qquad \frac{D}{D'} = \frac{v'}{v} \cdot \frac{P + 2\pi r N}{P + 2\pi r N'}.$$

Vese que la relación de las densidades de los dos líquidos no es ya igual al cociente inverso de los volúmenes sumergidos. La divergencia, representada por el factor $\frac{P + 2\pi r N}{P + 2\pi r N'}$, depende de la diferencia de las tensiones superficiales de los líquidos considerados.

3°. *Conclusión.* — Resulta de esta discusión que no es posible emplear con rigor el mismo areómetro para líquidos diferentes, pues basta una variación en la tensión superficial para falsear el equilibrio, produciendo un cambio mayor ó menor en la línea de flote. Por ejemplo, cuando un areómetro sensible es sumergido en el agua y se mantiene allí en equilibrio, basta difundir por la superficie del agua un rastro imperceptible de un cuerpo graso, que se extiende en ella á manera de finísimo velo, para hacer subir al instrumento una cantidad notable, á causa de que disminuye la tensión superficial.

Los únicos areómetros perfectamente exactos son, pues, los de graduación empírica y que no sirven *más que para un líquido*, hechos con arreglo al modelo del alcoholímetro de Gay-Lussac.

1. Duclaux, *Journal de physique* (1872).

2. En un líquido que no mojara al areómetro, el efecto de la tensión superficial sería inverso : el instrumento, en vez de penetrar más, sería impulsado hacia fuera del líquido.

LIBRO VI

ACÚSTICA

CAPÍTULO PRIMERO

PRODUCCIÓN, PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DEL SONIDO.

271. **Objeto de la acústica. — Sonidos y ruidos.** — La *acústica*[1] tiene por objeto el estudio de los sonidos, esto es, de las sensaciones del oído, tanto en lo referente á su producción como á su propagación.

La música considera los sonidos con relación á los sentimientos que pueden excitar en nosotros; la acústica sólo trata de las propiedades físicas de los sonidos, haciendo abstracción de las sensaciones estéticas que provocan en nuestro ánimo.

No todos los sonidos son idénticos; presentan diferencias bastante sensibles entre sí para que sea posible distinguirlos, compararlos y determinar sus relaciones.

Debe distinguirse el sonido del *ruido*. El primero propiamente dicho, ó *sonido musical*, es el que da origen á una sensación continua cuyo valor armónico puede apreciarse, mientras que el ruido es, ya como en el caso del cañón un sonido demasiado corto para que sea posible clasificarlo en la escala musical, ya una mezcla confusa de varios sonidos discordantes, como el retumbar del trueno ó el rumor de las olas. Sin embargo, la diferencia entre el sonido no está claramente determinada : ha sido posible en efecto apreciar las elevaciones de una serie de ruidos producidos sucesivamente y calcular sus relaciones.

272. **Causa del sonido.** — El sonido es el resultado de oscilaciones rápidas ejecutadas por las moléculas de los cuerpos elásticos, cuando se ha perturbado el estado de equilibrio de aquéllos por el choque ó el rozamiento. Entonces tienden á recobrar sus posiciones iniciales; pero no lo consiguen sino ejecutando, á un lado y otro de estas posiciones, movimientos vibratorios sumamente rápidos, cuya amplitud disminuye con mucha rapidez.

1. En griego ἀκουστικὴς, de ἀκούειν, oir.

Llámase *cuerpo sonoro* al que emite ó puede emitir un sonido, y *vibración simple* al movimiento comprendido entre un *ir* y un *regresar* de las moléculas vibrantes, *vibración doble* ó *completa* al movimiento de *ir* y de *volver* (de vaivén).

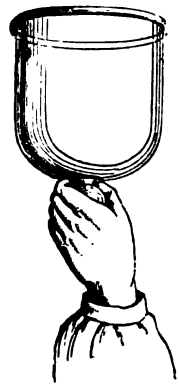


Fig. 272.

El estado vibratorio de un cuerpo que suena es fácil de probar por medio de experiencias muy sencillas. Si se arroja polvo ligero sobre el cuerpo sonoro, toma aquél un movimiento de trepidación muy rápido y visible á simple vista. Análogamente si se pulsa una cuerda algo tensa, sus vibraciones son aparentes. Basta tomar una campana de vidrio por su botón superior (fig. 272) y manteniéndola vertical con una mano, darle con la otra un golpe seco, de modo que sus paredes vibren. Ahora bien, si se coloca dentro un pequeño fragmento de metal, éste sufre, por parte de las paredes vibrantes, pequeños y repetidos choques, que resultan de un movimiento de trepidación más ó menos vivo, acompañado de un ruido seco particular. Colocando la mano sobre las paredes de la campana, se apagan las vibraciones y los choques.

273. **El sonido no se propaga en el vacío.** — Las vibraciones de los cuerpos elásticos no pueden producir en nosotros la sensación del sonido más que por la intervención de un medio ponderable, situado entre el oído y el cuerpo sonoro, y que vibra al mismo tiempo que éste. Este medio es de ordinario el aire; pero los gases, los vapores, los líquidos y los sólidos transmiten también el sonido.

Fig. 273.

Supongamos en efecto que se coloque debajo de la campana de una máquina neumática un timbre á campanilla metálica que toque de manera automática, movida por un aparato de relojería (fig. 273). Mientras la campana esté llena de aire á la presión ordinaria, se oirá el llamar del timbre; pero á medida que el fluido va enrareciéndose, la intensidad del sonido disminuye, dejando al fin de ser perceptible cuando ha llegado el vacío á un grado suficiente.

Para que el experimento salga bien, hay que poner la campanilla

sobre algodón en rama; de otro modo las partes metálicas del instrumento transmitirían sus vibraciones á la platina de la máquina neumática, y ésta al aire exterior.

También se emplea un matraz de vidrio con llave, que contiene una pequeña campana colgada de un hilo. Si se agita el globo cuando está lleno de aire, se oye distintamente la campanilla; pero una vez que se ha enrarecido suficientemente el fluido dentro, ya no se oye nada.

274. **El sonido se propaga en todos los cuerpos elásticos.** — Si en los experimentos anteriores se empieza por hacer el vacío y después se introduce en el recipiente un gas ó un vapor, óyese de nuevo el timbre ó la campanilla: esto demuestra que el sonido se propaga en los gases y en los vapores como en el aire.

Aun lo hace mejor en los líquidos. Cuando se hacen chocar dos piedras dentro del agua, en un río, se oye distintamente desde la orilla el ruido que producen. Al contrario, un buzo oye en el fondo del líquido lo que se dice fuera.

Cuanto á los sólidos, su conductibilidad es tan grande, que un ruido sumamente ligero, como el de una barba de pluma que se frota contra la extremidad de una viga de madera, se distingue desde la otra punta. El suelo conduce el sonido tan bien que, aplicando el oído al suelo durante la noche, se pueden percibir á grandes distancias pisadas de caballos ó cualquier otro ruido.

275. **Velocidad del sonido en los gases.** — La propagación del sonido en los gases, los líquidos ó los sólidos no es instantánea: el sonido no puede transmitirse de un punto á otro sino en intervalo más ó menos largo. Así lo demuestran gran número de fenómenos, entre otros el trueno: al cabo de algún tiempo de ver el relámpago se oye el ruido, por más que su producción ha sido simultánea en la nube.

Llámase *velocidad del sonido* en un medio elástico que lo transmite, *al espacio que recorre en un segundo.*

Velocidad del sonido en el aire. Experiencia de la Oficina de Longitudes (1822). — Se han hecho numerosas tentativas [1] para determinar la velocidad del sonido en el aire atmosférico. La última se llevó á cabo en el verano de 1822, durante la noche, por los miembros de la Oficina de Longitudes. Al efecto se escogieron como estaciones dos alturas, una situada en Villejuif, y otra en Montlhéry, cerca de París.

Método. — En cada estación se tiraba un cañonazo cada diez minutos. Los observadores de Villejuif oyeron perfectamente los doce cañonazos disparados en Montlhéry; pero éstos sólo distinguieron siete de los doce de Villejuif, por ser contraria la dirección del

1. Deben recordarse, entre otras, las experiencias de los académicos de París, ejecutadas el año 1736 entre Montmartre y Montlhéry; dieron 183 toesas ó 337 m. por segundo, á 6° C próximamente. Para 0° C resultarían 332 m.

viento. Las dos estaciones tomaban nota con los cronómetros del tiempo que transcurría entre la producción del fogonazo y la audición del sonido. Este tiempo podía considerarse igual al que tardaba el sonido en recorrer la distancia de las dos estaciones, pues ésta se reduce á 18,612,52 m, y ya veremos que la luz cruza esta distancia en un tiempo inapreciable.

Resultados. — Valor medio de la velocidad. — De esta manera se probó que la duración media de propagación entre las dos estaciones era de $54^s,6$; dividiendo la distancia por este número, resulta que la velocidad del sonido es de 340,9 m. á la temperatura media de los experimentos, que fué de 15°,9 C.

Influencia de la temperatura. — La velocidad del sonido en el aire disminuye cuando baja la temperatura : á 10° sólo es de 337 metros; á cero, de 333 metros. Pero dada la misma temperatura, es independiente de la densidad del aire y por tanto de la presión atmosférica.

Influencia de la elevación del sonido. — Dada una misma temperatura, la velocidad en el aire es idéntica para todos los sonidos, ya sean fuertes ó débiles, graves ó agudos. Este hecho resulta de otras experiencias, ejecutadas por Biot, sobre la propagación del sonido en las cañerías. Así observó que cuando se tocaba la flauta en la punta de un tubo de fundición de 951 metros de longitud, se oía el trozo de música en la otra punta sin la menor alteración de ritmo ni de melodía : esto probaba que los diferentes sonidos se propagan con velocidades iguales.

Influencia de la naturaleza del gas. — Por fin, la velocidad del sonido varía de un gas á otro, dada la misma temperatura. Así, Dulong encontró como velocidad del sonido en diferentes gases, á la temperatura de cero, los números siguientes [1] :

Ácido carbónico.	261	metros.
Oxígeno.	317	—
Aire.	333	—
Óxido de carbono.	337	—
Hidrógeno.	1269	—

276. **Cálculo de la velocidad del sonido en los gases. — Fórmula de Newton. — Corrección de Laplace.** — Newton fué el primero que halló por el cálculo la fórmula $V = \sqrt{\frac{E}{D}}$, en que V representa la velocidad de propagación de un movimiento vibratorio en un medio elástico, E el *coeficiente de elasticidad* del medio y D su *densidad absoluta* (125).

En el caso del sonido que se propaga en el aire á la presión p y á la temperatura t, hay que calcular los valores de E y D.

Primeramente E es igual á la fuerza elástica del gas que equilibra á la presión p : luego $E = p$.

Cuanto á la masa de la unidad de volumen de agua (sea $1m^3$, es igual á $\frac{1.293}{g}$ kg á 0°, y á t° es igual á $\frac{1,293}{g} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{1+\alpha t}$, siendo p_0 la presión normal,

1. Estos números han sido calculados por medio de las fórmulas de los *tubos sonoros*

que se puede considerar como igual á 10330 kg por metro cuadrado. Por fin resulta

$$V = \sqrt{\frac{g.\ 10\,330\,(1 + \alpha t)}{1{,}293}},$$

fórmula independiente de *p*. Luego la velocidad del sonido en el aire es *independiente* de la presión atmosférica y *proporcional* á la raíz cuadrada de *g* y á la raíz cuadrada del binomio de dilatación.

Si se calcula el valor de V para la temperatura 0°, se obtiene $V_0 = 280$ m. Esto permite escribir la fórmula de este modo

$$V = 280\sqrt{1 + \alpha\, t},$$

donde se pone de manifiesto la influencia de la temperatura.

Los valores de V dados por esta fórmula han sido siempre más pequeños (1/6 próximamente) que los obtenidos de manera experimental. Laplace explicó esta divergencia por una circunstancia que Newton no tuvo en cuenta : el desprendimiento de calor que se produce por efecto de la presión, en las ondas condensadas, y que no puede disiparse instantáneamente, á causa de la rapidez de propagación y de la mala conductibilidad calorífica de los gases.

Para corregir este error hay que multiplicar la fórmula de Newton por el término $\sqrt{\frac{C}{c}}$, en que C es el calor específico, bajo presión constante, del gas an que el sonido de propaga, y *c* su calor específico en volumen constante [1]. Para el aire este término es sensiblemente igual á $\sqrt{1{,}41}$ ó 1,1874. Así se restablece casi enteramente la concordancia con el dato experimental (tiénese 280. 1,1874 = 332,4). Sin embargo, esta fórmula no conviene más que en el caso de sonidos muy pequeños y no en los de gran intensidad.

277. **Velocidad del sonido en los líquidos y los sólidos.** — La velocidad del sonido en los líquidos es mucho mayor que en el aire. Colladon y Sturm encontraron, en las experiencias llevadas á cabo el año 1827 en el lago de Ginebra, que la velocidad del sonido en el agua es de 1435 metros á la temperatura de 8°,1, más del *cuádruple* que en el aire. Calculando la velocidad en el agua con arreglo á la fórmula de Newton, que se aplica directamente á los líquidos, puesto que su compresión no emite calor apreciable, se ha obtenido V = 1425 m á 8°. Es casi lo mismo.

En los sólidos es aun mayor la velocidad del sonido. Biot descubrió experimentalmente que en la fundición ó hierro colado el sonido se propaga 10 veces 1/2 más de prisa que en el aire. Chladni, Savart, Masson y Wertheim han hecho el cálculo con otros cuerpos. El primero descubrió que en las diferentes especies de maderas, la velocidad es unas 10 á 16 *veces mayor* que en el aire. Varía más en los metales, pues pasa de 4 *á* 16 *veces* la velocidad en la atmósfera [2].

1. Véase la definición de estos coeficientes en el libro VIII, consagrado al estudio del calor.

2. Apliquemos, por ejemplo, la fórmula $V = \sqrt{\frac{E}{D}}$ al cálculo de la velocidad del sonido

272. **Modo de propagación del sonido en el aire: Idea sintética del fenómeno.** — Es posible formarse idea de la propagación del sonido en un medio elástico con sólo observar otro fenómeno muy común, la caída de una piedra en un estanque ó charca tranquila.

La piedra cae, choca con el agua y la deprime primero en el punto de la caída; pero casi inmediatamente el líquido se levanta otra vez en torno del centro de depresión, y se forma una prominencia circular, que va extendiéndose poco á poco y ensanchándose en la superficie del agua y que pierde en grueso á medida que gana en anchura: esto se llama una *onda condensada.* Mientras se propaga esta onda por la superficie del agua, el líquido se ha levantado en el centro, formando, en vez de la depresión inicial, una eminencia del mismo volumen. Esta pequeña montaña no puede originarse sino á condición de que en torno suyo se produzca un vallecito; de donde resulta una nueva prominencia circular, *hueca* y no *en relieve*, y que se propaga como la anterior por círculos concéntricos al punto de partida de la agitación. Así como se ha dado el nombre de *onda condensada* á la que resultaba de una compresión, así se llama *onda dilatada* á esta última, que resulta de una especie de dilatación, sin cambio de lugar, del medio elástico. El conjunto de estas dos ondas contrarias constituye una *onda completa.*

Y debe observarse que en ninguna de estas ondas *se mueve el agua* huyendo del centro; lo que se propaga es *el movimiento de oscilación* á través de las capas de agua concéntricas. Efectivamente si se coloca en un punto del líquido un cuerpo ligero, como por ejemplo un pedacito de papel, éste oscila sin adelantar ni retroceder y sigue el movimiento de las ondas, que lo elevan ó lo bajan alternativamente, sin alejarse del centro al mismo tiempo que ellas.

He ahí lo que pasa cuando se ha producido un solo choque en el centro de agitación: se origina una sola *onda condensada*, seguida por una sola *onda dilatada;* y el centro de las ondas habrá vuelto á quedar tranquilo, el agua estará de nuevo allí inmóvil como un espejo, cuando todavía seguirá mucho tiempo el movimiento en la circunferencia, siempre constituído por ondas, alternativamente de sentido contrario, que se extienden debilitándose cada vez más. Pero si el primer choque ha sido bastante intenso — según ocurre en el caso ordinario, — el agua del centro no volverá inmediatamente al reposo, sino que ejecutará una serie de oscilaciones

en una barra de hierro indefinida. Tiénese E = 20 000 kg por mm² y, de consiguiente, 20 000 000 000 kg. por metro cuadrado. Resulta

$$D = \frac{7700}{g}; \qquad \text{luego} \qquad V = \sqrt{\frac{9.81.20\,000\,000\,000}{7700}} = 5100 \text{ m};$$

que viene á ser unas *quince veces* la velocidad del sonido en el aire.

isócronas, parecidas á las de un péndulo y que irán debilitándose. Estas oscilaciones todas dan origen á pares de ondas condensadas, y dilatadas, que se ven correr unas detrás de otras por la superficie del agua.

Longitud de onda. — Si se examinan con atención estas ondas, por ejemplo las infladas, que son las más aparentes, obsérvase con facilidad que están *equidistantes*. Y así debe ser, pues la distancia de dos ondas consecutivas es precisamente igual al espacio que el movimiento ha recorrido en lo que dura una oscilación completa del centro de agitación. Si se llama λ esta distancia, T la duración de una oscilación completa y V la velocidad de propagación en el agua, debe tenerse $\lambda = VT$: λ es constante, á condición de que V y T lo sean también. Esto es lo que se llama una *longitud de onda*.

Entre dos ondas infladas consecutivas, y á igual distancia de ellas se encuentra una onda deprimida, donde las moléculas líquidas están animadas de velocidades contrarias á las que posean, en el mismo instante, las moléculas de las ondas cercanas. La distancia comprendida entre una onda inflada y una deprimida consecutiva es igual á la mitad de una longitud de onda $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$. y se llama una *semi-longitud de onda*.

Observación. — Se ve además que en un mismo radio, á partir del centro de agitación, dos puntos que disten $\frac{\lambda}{2}$ estarán siempre animados de velocidades de sentido contrario; lo mismo ocurrirá si distan $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$... y en general un *número impar* $(2n+1)$ de $\frac{\lambda}{2}$. Por el contrario, dos puntos distantes λ $\left(\text{ó } 2\frac{\lambda}{2}\right)$, 2λ ó $\left(4\frac{\lambda}{2}\right)$... y en general un *número par* de $\frac{\lambda}{2}$ estarán animados por velocidades del mismo sentido.

Ondas sonoras. — Este fenómeno tan sencillo puede considerarse como el tipo de los movimientos vibratorios. El de los cuerpos sonoros, que constituye el sonido, se propaga en el aire, á la manera que el anterior lo hace en el agua; pero como las vibraciones del cuerpo sonoro se transmiten en torno suyo por la atmósfera ambiente, las *ondas sonoras* son esféricas, en vez de circulares como las *acuosas*. Además, la vibración no es aquí *transversal*, quiere decir, perpendicular al radio de la onda, según pasa en el agua, sino *longitudinal*, quiere decir, dirigida según el rayo sonoro. Pero los caracteres esenciales del movimiento que hemos estudiado, quiere decir, la *periodicidad de la vibración* y la *constancia de la velocidad de propagación*, se observan en el aire lo mismo que en el agua.

279. Propagación del sonido en el aire : análisis del fenómeno. — 1°. *Caso de un tubo sonoro.* — Consideremos el caso de un medio gaseoso limitado, por ejemplo un

tubo ó conducto MN prismático (fig. 274) lleno de aire á una presión y á una temperatura constantes. Supongamos un diapasón que suene en el orificio del tubo; la rama *a* oscila como péndulo entre las dos posiciones extremas *a'* y *a"*, y sus vibraciones se propagan por la columna de aire del tubo.

Precisa considerar dos fases perfectamente distintas; la de ida, entre la posición *a"* y la *a'* de la rama, y la de regreso, entre la posición final *a'* y la inicial *a"*. Durante la primera fase, la rama vibrante comunica al aire del tubo una serie de impulsiones, cuya velocidad y la intensidad por consiguiente, va cre-

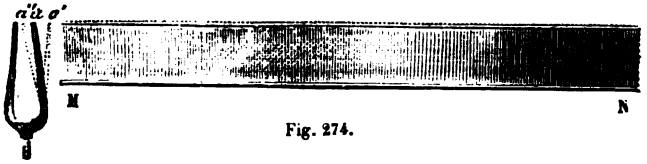


Fig. 274.

ciendo primero (desde *a"* hasta *a*) y luego decreciendo (desde *a* hasta *a'*). Cada una de estas impulsiones sucesivas se propaga á través de la columna de aire, en virtud de la elasticidad de este gas. En el momento en que la rama llega á la posición *a'* y comunica su último impulso, el primero se ha propagado hasta una distancia igual á $\frac{1}{2}$ VT (siendo V la velocidad de propagación del sonido); la región anterior de la columna de aire se encuentra pues en un estado de condensación particular por espacio de una longitud igual á $\frac{1}{2}$ VT : he ahí lo que se llama *onda condensada*. Durante la segunda fase de la vibración, la lámina vibrante huye delante de la capa de aire yuxtapuesta y le comunica, no ya una serie de impulsiones, sino una de aspiraciones ó de dilataciones, cuya velocidad va primero creciendo (entre las posiciones *a'* y *a*) y luego decreciendo (entre *a* y *a"*). Durante el mismo tiempo, la porción de la columna de aire que era precedentemente lugar de la *onda condensada*, ha vuelto al reposo, por efecto de la propagación de ésta, y pasa á ser lugar de una *onda dilatada*, á consecuencia de las dilataciones que recibe sucesivamente durante el tiempo $\frac{T}{2}$ de esta segunda fase de la vibración. Luego, al cabo del tiempo T, el estado de la columna de aire es el siguiente : la porción anterior es lugar de una onda dilatada en una longitud $\frac{1}{2}$ VT, y la porción inmediata, en una longitud igual, es lugar de la primera onda condensada, que se ha transportado allí ; de manera que en una longitud VT = λ, la columna de aire es lugar de una onda sonora completa. Durante los períodos siguientes, se originan nuevas ondas en la porción anterior del conducto, mientras que las precedentes se prolongan en toda su longitud con la velocidad constante V. Al cabo de cierto tiempo, la columna de aire se divide en capas de longitud $\frac{\lambda}{2}$, que son alternativamente lugar de ondas condensadas y dilatadas sucesivas.

Representación gráfica del estado permanente de un tubo sonoro. — Puede repre-

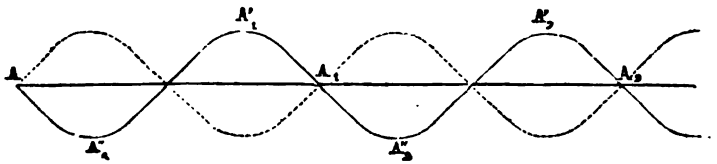


Fig. 275.

sentarse geométricamente el estado permanente de la columna de aire vibrante, levantando sobre el eje mismo del tubo una serie de perpendiculares proporcio-

nales una por una á la velocidad de condensación ó de dilatación de la capa de aire correspondiente (fig. 275).

Estas perpendiculares tienen una longitud nula en los puntos A, A_1, A_2..., donde la variación de densidad es nula; y una longitud máxima en A'_1, A'_2..., y A''_1, A''_2..., en que esta variación es mayor. Las ordenadas correspondientes á las condensaciones están todas á un mismo lado del eje horizontal, y las correspondientes á las dilataciones están al otro. Su conjunto constituye una curva, de forma de sinusoide, compuesta de bucles iguales, alternativamente positivos y negativos. La longitud total de dos bucles consecutivos es igual á λ, y la de un bucle único igual á $\frac{\lambda}{2}$. Por fin, como cada porción del tubo es sucesivamente lugar de ondas condensadas y de ondas dilatadas, se ha puesto en evidencia esta circunstancia por medio de una sinusoide puntuada, simétrica respecto de la llena.

2°. *Caso de una atmósfera ilimitada.* — Fácilmente se pasa del caso anterior al de una atmósfera gaseosa ilimitada. Como la propagación se efectúa en todos sentidos al mismo tiempo, las condensaciones y las dilataciones sucesivas se transmiten á superficies esféricas, concéntricas al cuerpo sonoro. Las ondas son ahora esféricas; pero su *longitud* y su *velocidad de propagación* permanecen idénticas á lo que eran antes. La única diferencia es que la intensidad del movimiento vibratorio irá disminuyendo rápidamente á medida que la onda se ensanche, por transmitirse á una masa de aire cada vez mayor: de donde resultará rápida debilitación del sonido.

280. **Reflexión del sonido.** — Cuando las ondas sonoras encuentran un obstáculo, vuelven sobre sí mismas, formando nuevas ondas concéntricas que *parecen emanar* de un segundo centro sonoro, situado por la otra parte del obstáculo: entonces se dice que las ondas se *han reflejado.*

La figura 276 representa una serie de ondas incidentes reflejadas en un obstáculo plano PQ. Si se considera, pongamos por ejemplo, la onda incidente MCDN, emitida desde el centro A, la onda refle-

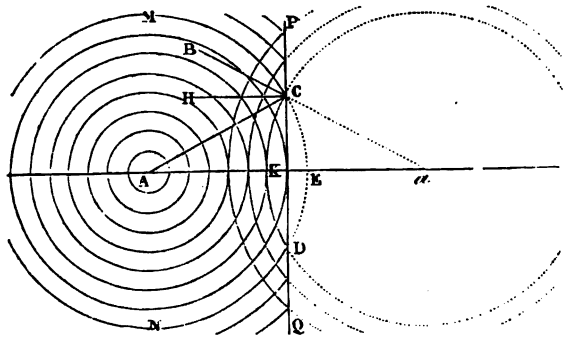


Fig. 276.

jada correspondiente está representada por el arco CKD, de que es *centro virtual* el punto *a*. La recta AC, según la cual se propaga el sonido desde A hacia C, es un *rayo sonoro;* y si por el punto C se levanta una perpendicular CH á la superficie reflectora, el ángulo ACH que forma el rayo sonoro con esta perpendicular se denomina

ángulo de incidencia; por fin, el ángulo BCH, que el rayo sonoro reflejado BC forma con la misma perpendicular, es el *ángulo de reflexión.*

La reflexión del sonido está sometida á las dos leyes siguientes (que son idénticas, según veremos, para el calor y la luz):

1°. *El rayo sonoro incidente y el reflejado están en un mismo plano, perpendicular á la superficie reflectora.*

2°. *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*

Más adelante veremos cómo se demuestran estas dos leyes respecto del calor por medio de dos espejos cóncavos colocados uno enfrente del otro á varios metros de distancia. Lo mismo puede hacerse con el sonido, colgando un reloj en el foco de uno de los espejos y aplicando el oído en el foco del otro. Los tic-tacs del reloj, enviados por reflexión desde el primer espejo al foco del segundo, son oídos distintamente por un observador que coloca en este punto, sea su oído, sea el orificio de un pequeño tubo acústico.

281. **Ecos y resonancias.** — Según las leyes de la reflexión, el sonido, que se propaga primeramente á partir del punto A (fig. 276) en todas las direcciones, tales como AC, se propaga además, después de su reflexión contra PQ en todas direcciones, tales como *a*CB, emanadas del punto *a*. De ahí resulta que un observador colocado en B oirá, á más del sonido que sale del punto A, un segundo sonido que le parecerá emitido en la dirección *a*CB.

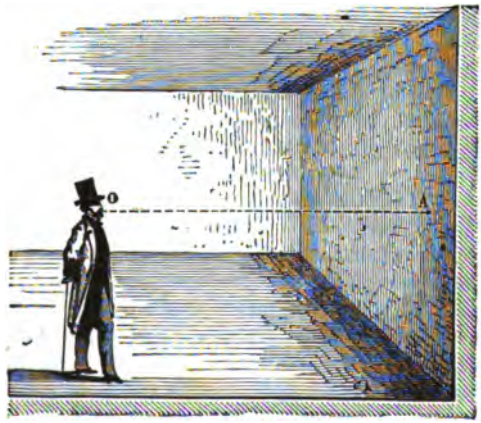


Fig. 277.

Llámase *eco* [1] á este fenómeno de la repetición de un sonido en el aire por efecto de su reflexión en algún obstáculo.

Tratándose de un sonido muy breve, como un choque, puede haber eco cuando la superficie reflectora dista sólo unos 17 metros. Esto se debe al hecho fisiológico de que una sensación sonora persiste por lo menos un décimo de segundo. En efecto, durante este intervalo de tiempo el sonido recorre unos 34 metros; de modo que si se coloca en A un observador, á más de 17 metros de un

1. Del griego ἠχω, sonido.

obstáculo, tal como una pared K, que sirve de reflector (fig. 277), el sonido reflejado llegará á su oído después que se haya apagado la sensación del sonido directo, y podrá distinguirlo sin confusión ninguna, con tal que la intensidad del sonido sea suficiente.

Con los sonidos articulados precisa por lo menos una distancia doble, es decir 34 metros, para que el eco sea claramente distinguido. Esto es consecuencia del hecho fácil de observar que no es posible distinguir claramente más de cinco sílabas por segundo. Ahora bien, como la velocidad del sonido es de 340 metros por segundo, síguese de aquí que en un quinto de segundo recorre el sonido 68 metros. De consiguiente, si el obstáculo reflector está á una distancia de 34 metros, el sonido tendrá que recorrer 68 para ir hasta el obstáculo y volver. El tiempo transcurrido entre el sonido articulado y el reflejo será pues de un quinto de segundo: en consecuencia los dos sonidos no se confundirán, y el sonido reflejado será oído de manera distinta.

Resonancias. — Cuando la distancia de la superficie reflectora es menos de 34 metros para los sonidos articulados y de 17 para los ruidos aislados, como el sonido directo y el reflejado tienden á confundirse, no es posible oirlos separadamente; pero el sonido es reforzado y se hará tanto más confuso cuanto que irán á agregarse al principal multitud de reflexiones parciales, emanadas de diversos puntos de la misma sala: entonces se dice que hay *resonancia.* Esto es lo que se observa en las habitaciones muy grandes. Las salas desnudas son muy sonoras; por el contrario, las cortinas y tapices, que reflejan mal el sonido, las hacen *sordas.*

Ecos monosilábicos y polisilábicos. — Según lo antedicho, si se habla en alta voz delante de un reflector que diste 34 metros, el eco no repetirá sino la última sílaba pronunciada; el eco es, pues, *monosilábico.* Si el reflector dista dos veces, tres veces 34 metros, el eco será *disilábico, trisilábico* y repetirá dos ó tres sílabas sucesivas.

Ecos múltiples. — Llámase *ecos múltiples* á los que repiten varias veces el mismo sonido: así sucede cuando dos obstáculos colocados uno frente á otro, dos paredes paralelas por ejemplo, se lanzan sucesivamente el sonido. Hay algunos que repiten hasta veinte ó treinta veces la misma voz. Cítase en particular el del castillo de Simonetta, cerca de Milán, que repite *cuarenta veces* una palabra pronunciada entre las dos alas paralelas del edificio.

Observaciones. — La existencia de los ecos es una consecuencia, y por tanto una prueba experimental, de la reflexión del sonido. No sólo se efectúa en las superficies planas, como las paredes de los edificios, sino también muchas veces en las curvas, tales como las bóvedas de iglesias ú otros edificios, dando origen á ecos muy perceptibles.

Así sucede algunas veces que cuando se habla debajo del ojo de un puente de piedra, con la cara vuelta hacia uno de los estribos, la voz se reproduce cerca del otro con intensidad bastante para que se pueda mantener una conversación en voz baja, sin que la oigan las personas situadas en el espacio intermedio.

La figura 278 representa una cripta de iglesia de bóveda elíptica, en que este

género de eco está indicado y explicado al mismo tiempo por la reflexión de los rayos sonoros, que parten de uno de los focos de la elipse y son enviados al otro. El museo de los Antiguos del palacio del Louvre tiene una sala de esta clase

Fig. 278.

También hay otra en el piso bajo del Conservatorio de Artes y Oficios de París, cuadrada y de bóveda elíptica, donde se observa este fenómeno de manera notable, cuando las personas se colocan en los dos focos de la elipse.

282. **Refracción del sonido.** — Más adelante veremos que por *refracción* se entiende un cambio de dirección que experimentan la luz y el calor al pasar de un medio á otro. Pues bien, Sondhauss ha probado que las ondas sonoras se refractan lo mismo que el calor y la luz.

Lente de Sondhauss. — Córtanse en un globo grande de colodión dos fragmentos iguales, y se les adapta en los dos bordes de un anillo de hierro que tenga 31 centímetros de diámetro, de modo que formen una lente biconvexa, hueca, cuyo grueso en el centro es de unos 12 centímetros. Después se llena de ácido carbónico la lente así formada y, colocando un reloj en la dirección del eje, se busca por la otra cara el punto donde se oye con mayor intensidad el tic-tac. Así se observa que mientras el oído está muy alejado del eje, apenas se percibe el sonido; pero una vez en aquella dirección y á conveniente distancia de la lente, entonces se le distingue muy bien : lo cual prueba que las ondas sonoras se han refractado con arreglo á las mismas leyes que la luz y el calor.

283. **Circunstancias que alteran la intensidad del sonido.** — Estas son : la distancia del cuerpo sonoro, la amplitud de las vibraciones, la densidad del aire en el punto donde el sonido se produce, la dirección de las corrientes de aire, y por fin la proximidad de otros cuerpos sonoros.

1°. *La intensidad del sonido varía en razón inversa del cuadrado de la distancia del cuerpo sonoro.* — Esta ley es una consecuencia teórica del modo de propagación del sonido en un medio indefinido (279, 2°). En efecto, se ha visto que la sacudida molecular producida por el cuerpo sonoro que vibra en el aire se propaga en esferas concéntricas cuyas superficies varían proporcionalmente al cuadrado de sus radios. Por consiguiente, la cantidad de fuerza viva que se transmitirá desde diversas distancias hasta una superficie determinada, como la oreja de un experimentador, variará en razón inversa de las superficies esféricas correspondientes y, por tanto, *en razón inversa de los cuadrados de las distancias al cuerpo sonoro.*

2°. *La intensidad del sonido aumenta con la amplitud de las vibraciones del cuerpo sonoro.* — La relación que existe entre la intensidad del sonido y la amplitud de las vibraciones se prueba fácilmente haciendo vibrar cuerdas metálicas bastante largas para que sus oscilaciones sean sensibles á la vista : entonces se comprueba que el sonido se debilita cuando decrece la amplitud de las oscilaciones.

3°. *La intensidad del sonido depende de la densidad del aire en el punto donde aquél se produce.* — En el hidrógeno, que es unas 14 veces menos denso que el aire, tienen los sonidos intensidad mucho menor, aunque la presión sea idéntica. Por el contrario, en el ácido carbónico, cuya densidad respecto del aire es de 1,529, los sonidos se hacen más intensos. En las montañas muy elevadas hay que gritar mucho para hacerse oir, por causa del enrarecimiento del aire y la explosión de un arma de fuego origina ruido muy escaso.

4°. *La intensidad del sonido es modificada por la agitación del aire y la dirección de los vientos.* — Obsérvase que cuando el tiempo está tranquilo, el sonido se propaga siempre mejor que cuando hace viento y que en este último caso el sonido es más intenso en la dirección del viento que en la contraria, cuando la distancia es igual.

5°. *El sonido es reforzado por la proximidad de un cuerpo sonoro.* — Una cuerda de instrumento, tensa en el aire libre y lejos de todo cuerpo sonoro, no emite sino sonido muy débil ; pero si se encuentra sobre una caja sonora, como en la guitarra, el violín ó el violón, entonces produce sonido lleno é intenso. Esto se debe á que la caja y el aire contenido en ella vibran al unísono con la cuerda. De aquí el uso de cajas sonoras en los instrumentos de cuerdas.

284. **Reforzamiento del sonido por los tubos.** — Cuando el sonido se transmite por tubos, su intensidad no varía en razón inversa del cuadrado de la distancia, sobre todo si aquéllos son cilíndricos y

rectos. Entonces las ondas sonoras dejan de propagarse bajo la forma de esferas concéntricas crecientes y el sonido puede llegar á distancias considerables sin disminución sensible. Biot observó que en una cañería de las aguas de París, de 951 metros de largo, pierde la voz tan poca intensidad, que dos personas pueden sostener una conversación en voz baja desde los extremos. Sin embargo, en los tubos de gran diámetro, ó en aquellos que presentan anfractuosidades es sensible la disminución. Así se nota en los subterráneos y en las galerías largas. Esta propiedad de los tubos y conductos se ha utilizado para numerosas aplicaciones prácticas.

285. **Tubos de conversación** (*speaking tubes*). — Uno de los más comunes consiste en los *tubos-acústicos* ó *de conversación*, para hablarse á distancia. Vienen á ser verdaderos *teléfonos* acústicos, pero de escaso alcance.

Consisten ordinariamente en conductos cilíndricos, flexibles, de caucho, que terminan en dos embocaduras de hueso ó marfil; en cada una de ellas se encaja un silbato. Primero se sopla en el tubo para que un silbido avise á la persona con quien se desea hablar. Ésta hace lo mismo, para indicar que está en su puesto, y después se pone la embocadura en el oído, mientras que el interlocutor habla en voz baja por la otra embocadura.

286. **Bocina.** — Este instrumento se funda al mismo tiempo en el refuerzo y en la facilidad de transmisión del sonido por los tubos.

Destínasele á transmitir la voz á distancia. Consiste en un tubo de latón ú hojalata (fig. 279), ligeramente cónico y algo ensanchado en una de sus abertu-

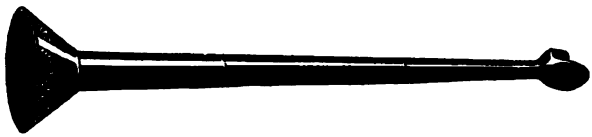


Fig. 279.

ras, que se llama *pabellón*. Háblase por el otro extremo, y la voz llega tanto más lejos cuanto mayores son las dimensiones de la bocina.

Las usadas en la marina tienen hasta 2 metros de longitud, con un pabellón cuyo diámetro llega á 30 centímetros. Una buena bocina puede hacer distinguir sonidos hasta 5 ó 6 kilómetros de distancia, sobre todo si son articulados. Sus efectos se explican en general por una serie de reflexiones sucesivas de las ondas sonoras sobre las paredes del tubo, reflexiones en virtud de las cuales tienden á salir las ondas propagándose en una dirección paralela al eje del instrumento.

Se ha objetado contra esta teoría que los sonidos emitidos en el instrumento no son reforzados sólo en la dirección de su eje, sino en todas. También se ha dicho que el pabellón es inútil para obtener el paralelismo de los rayos sonoros, mientras que por el contrario ejerce influencia considerable sobre la intensidad de los sonidos transmitidos. Por fin, cuando se forra con una tela de lana el interior de la bocina, su fuerza disminuye poco. Los efectos de este instrumento parecen debidos por tanto más bien á su reforzamiento producido por la columna de aire que vibra en el tubo al unísono del sonido emitido en la embocadura. Cuanto al efecto del pabellón, hasta hoy no se le ha explicado de manera suficiente.

287. **Trompeta acústica.** — La trompeta acústica presta grandes servicios á las personas que tienen el *oído duro*. Consiste en un tubo cónico de metal que termina por uno de sus extremos en un pabellón destinado á la recepción de los sonidos, mientras que el otro se introduce en el oído. Aquí el pabellón sirve de embocadura, es decir que recibe los sonidos de la persona que habla. Estos so-

nidos se transmiten por una serie de reflexiones á la parte interior de la trompeta, de modo que las ondas, en vez de adquirir mucho desarrollo, se encuen-

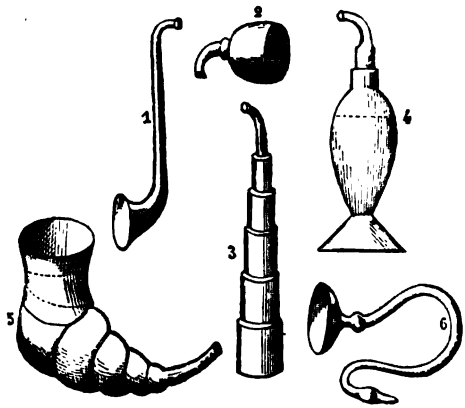


Fig. 280.

tran concentradas en el aparato auditivo, produciendo en éste efecto mucho más sensible del que hubieran tenido las ondas divergentes. La figura 280 (1, 2, 3, 4, 5 y 6) representa una serie de trompetas acústicas de formas diferentes.

288. **Audífono.** — Este es un pequeño aparato destinado, como la trompeta acústica, á facilitar y aun *á hacer posible* la audición por parte de las personas que padecen sordera en mayor ó menor grado. Fúndase en la gran conductibilidad de los cuerpos sólidos para el sonido.

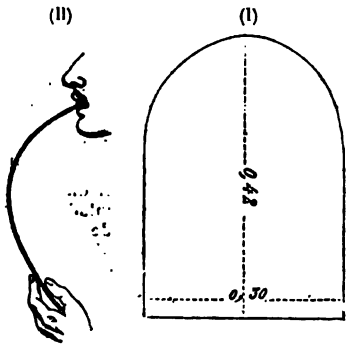


Fig. 281.

El primer instrumento de esta clase se debe á un americano R. G. Rhodes, de Chicago. Consiste en una especie de pantalla de caucho endurecido, cuya lámina se encorva en su extremidad. La persona coge el aparato por el mango y aplica la curvatura de la placa contra los dientes de su mandíbula superior.

Colladon simplificó este instrumento, haciéndolo en consecuencia menos costoso y más práctico, pues reemplazó el caucho endurecido por cartón del llamado en el comercio *cartón de abrillantar ó cartón de ortigas*. Constituye el audífono una simple hoja de 1 milímetro de grueso, sin mango ni otros accesorios (fig. 281, I y II). Se coge con la mano el borde rectilíneo y se aplica el convexo contra la mandíbula superior, dando á la placa una curvatura conveniente.

289. **Estetoscopio.** — Llámase así á un pequeño instrumento usado en medicina para auscultar á los enfermos. Hay varios tipos; pero aquí no describiremos sino el de Kœnig.

Viene á ser una especie de trompetilla acústica consistente en una cápsula de cobre cerrada por una membrana de caucho *c*, y dividida por dentro en dos partes por otra membrana *a*, de modo que al introducir aire entre las dos membranas mediante una llave lateral, aquéllas toman la forma de una lente biconvexa, según indica la sección de la figura 282. Del centro de la cápsula de cobre sale

un tubo de caucho terminado en un pedazo de cuerno ó de marfil *b*. El médico introduce la punta del conducto en su oido (fig. 283), á la vez que aplica la membrana *c* sobre el pecho del enfermo. Los latidos del corazón y los ruidos de la

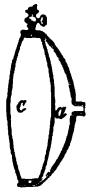


Fig. 282.

Fig. 283.

respiración se transmiten fielmente al aire encerrado en la cámara *ac*, y desde allí al oído por el tubo de caucho. Una persona puede auscultarse á sí misma. Si al aparato se adaptan varios tubos, cada uno de ellos puede servir para que un observador distinto ausculte al enfermo.

CAPÍTULO II

ELEVACIÓN DEL SONIDO.

MEDIDA DEL NÚMERO DE VIBRACIONES.

290. **Cualidades del sonido musical.** — El *sonido* propiamente dicho, ó *sonido musical*, es el resultado de vibraciones continuas, rápidas é *isócronas*, que producen en el órgano del oído sensación prolongada. Siempre es posible compararla con otros sonidos musicales.

El oído distingue en todo sonido musical tres cualidades específicas : la *elevación*, la *intensidad* y el *timbre*.

Elevación. — La *elevación* es la cualidad que resulta para el órgano del oído de la rapidez más ó menos grande del movimiento vibratorio, origen del sonido.

Llámanse *sonidos graves* los que corresponden á pequeño número de vibraciones por segundo, y *sonidos agudos* los que corresponden á gran número de vibraciones. Los sonidos todos no son graves ó agudos sino de manera relativa. Sin embargo, se dice un *sonido grave* ó un *sonido agudo* como se dice una *temperatura baja* ó una *temperatura elevada*, comparando el sonido con los que más ordinariamente se oyen.

Hemos definido la *elevación* por su causa física : también es posible hacerlo por la sensación fisiológica, y decir que es la cuali-

dad que distingue entre sí á los sonidos de análoga intensidad, producidos por un mismo instrumento.

Intensidad. — Se ha visto (283, 2°) que la *intensidad* ó *fuerza* del sonido depende de la amplitud de las oscilaciones y no de su número : el mismo sonido puede conservar idéntico grado de gravedad ó de agudeza, y adquirir intensidad mayor ó menor cuando se hace variar la amplitud de las oscilaciones. Esto sucede con una cuerda tensa, que se aparte más ó menos de su posición de equilibrio.

Timbre. — El timbre es la cualidad por la cual dos sonidos que proceden de instrumentos diferentes permanecen perfectamente distintos, por más que tienen la misma elevación é intensidad. Por ejemplo, el sonido del oboe es muy distinto del de la flauta ; el del cuerno de caza del sonido del trombón. Análogamente, la voz humana presenta timbre muy diferente, según los individuos, la edad ó el sexo : esto es lo que en la práctica ordinaria se llama el *metal de la voz.*

Ya veremos que el timbre particular que caracteriza un sonido determinado se debe á los sonidos armónicos (304) más ó menos numerosos que siempre lo acompañan.

291. **Métodos diversos para medir el número de las vibraciones.** — No hay más medio para demostrar que la altura de un sonido depende del número de sus vibraciones que medir este número y comparar los diversos sonidos desde este punto de vista. Para ello se pueden usar varios métodos :

1°. El *método acústico* ó *procedimiento de la sirena;*

2°. El *método gráfico* ó *procedimiento de Duhamel;*

3°. El *método óptico* ó *procedimiento de Lissajous;*

4°. El *método de las llamas manométricas* ó *procedimiento de Kœnig.*

Estos últimos sirven más bien para comparar los sonidos entre sí que para medir los números absolutos de vibraciones. No expondremos aquí sino los dos primeros.

292. **Método acústico. — Sirena de Cagniard de Latour.** — El *método acústico* se aplica por medio de un pequeño instrumento, llamado *sirena*[1].

Descripción. — La figura 284 representa la sirena montada en la caja E de un sistema de fuelles (294). En la parte inferior del instrumento, que es todo de cobre, hay una caja cilíndrica O, cubierta por un platillo fijo B. En este platillo descansa una barra vertical T, á que se adapta un disco A, que puede girar libremente con el vástago; en el platillo B se practican agujeros circulares equidistantes, y en el disco A existe número igual de agujeros del mismo tamaño y á la misma distancia del centro que los del platillo. Estos agujeros no son perpendiculares á las superficies del platillo y del disco; pero

1. Cagniard de Latour, su inventor, le dió el nombre de *sirena* porque se puede obligarla á emitir sonidos, *hacerla hablar* en el agua.

mientras unos se inclinan todos un mismo ángulo en idéntico sentido, los otros se inclinan en sentido contrario, de manera que cuando los agujeros del disco y los del platillo están enfrente, son opuestos uno á uno. De esta disposición resulta que cuando llega procedente de los fuelles á la caja cilíndrica y al agujero *m* una corriente de aire rápida, hiere oblicuamente las paredes del agujero *n*, é imprime al disco A un movimiento de rotación en el sentido A*n*.

Teoría. — Para simplificar la explicación, supongamos primero que el disco móvil A contenga 18 agujeros y que el platillo fijo B no presente sino uno. Consideremos el caso en que el agujero inferior coincida con uno de los superiores. El viento de los fuelles hiere entonces oblicuamente á este último y el disco móvil se pone á dar vueltas. La parte llena que se encuentra entre dos agujeros consecutivos va entonces á cerrar el hueco del platillo inferior; pero el

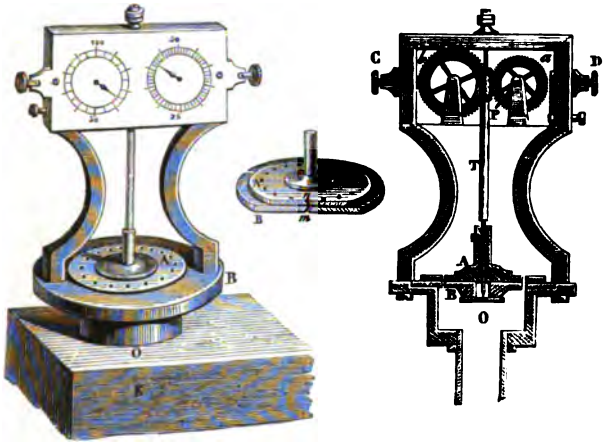


Fig. 284. Fig. 285. Fig. 286.

disco sigue girando en virtud de su velocidad adquirida y no tardan en verse frente á frente otros dos agujeros, de donde resulta nuevo impulso y así sucesivamente. Luego, durante una revolución completa del disco, el orificio inferior se abre 18 veces y se cierra otras 18. Resultan, pues, 18 impulsos por vuelta, que hacen entrar en vibración al aire y producen un sonido apenas gira el disco con suficiente rapidez.

Si se supone, según realmente ocurre, que el platillo fijo B tiene 18 agujeros como el disco giratorio, el fenómeno se producirá exactamente de la misma manera, porque los 18 agujeros serán abiertos y cerrados sucesivamente *al mismo tiempo;* luego, los 18 agujeros vib arán al unísono, el sonido será 18 *veces más intenso*, pero el

número de vibraciones *no aumentará*. En ambos casos es de 18 dobles por cada revolución del disco A.

Usos : aplicación del método acústico. — Falta contar las vueltas que efectúa el disco A durante un segundo. El vástago T sostiene un tornillo sin fin que transmite el movimiento á una rueda *a* provista de 100 dientes (fig. 286) y la hace adelantar un diente para cada revolución del disco. Y como la rueda *a* tiene un tope P, éste hace andar á su vez á cada vuelta un diente de otra rueda dentada *b*. Las dos ruedas llevan agujas que se mueven sobre dos cuadrantes é indican, una el número de vueltas del disco A y otra los centenares de vueltas. Dos botones D y C permiten engranar ó desengranar según convenga la pequeña rueda *a* con el tornillo sin fin.

Como el sonido va elevándose á medida que la velocidad del disco A aumenta, basta con forzar el viento de los fuelles para que el aparato emita un sonido determinado. Entonces se mantiene la velocidad constante durante cierto tiempo, por ejemplo 20 segundos; después se leen las indicaciones de los dos cuadrantes. Sea *n* el número de las unidades de vuelta y *c* el de las centenas : el número N de las vibraciones por segundo estará dado por la fórmula

$$N = \frac{18\,(n + 100\,c)}{20}.$$

Observación. — Se ha observado que la sirena emite el mismo sonido en el agua que en el aire, dada velocidad igual; lo mismo ocurre en los gases : esto prueba que la elevación de un sonido determinado no depende sino *del número* de las vibraciones, y no *de la naturaleza* del cuerpo sonoro.

293. **Sirena de Seebeck.** — Puede aplicarse el mismo método por medio de otra *sirena*, la de Seebeck, que es algo más complicada, pero que se funda en el mismo principio (fig. 287). El sonido es causado por una corriente de aire que pasa de manera discontinua por los agujeros de un disco giratorio. Este disco es generalmente de cartón y tiene en su circunferencia varias series de agujeros más ó menos numerosos. Está animado de movimiento muy regular gracias á un mecanismo de relojería contenido en una peana de madera. El sistema descansa en un depósito de viento, que distribuye la corriente de aire, por mediación de un *porta-viento* de caucho, á la serie de agujeros con que se desea experimentar.

Por lo demás, es posible colocar una serie de otros discos diferentes sobre el aparato, á fin de variar los experimentos.

294. **Fuelles.** — El aparato que sirve por lo común para *hacer hablar* á la sirena y en general á toda especie de tubos sonoros, se llama *sistema de fuelles*. Compónese de uno S, colocado entre las cuatro patas de una mesa y que funciona por medio de un pedal P (fig. 288). El aire impulsado se dirige á un depósito de cuero R, muy flexible, que se hincha poco á poco. Comprimido el aire por dos placas de plomo que ejercen su peso sobre el depósito, pasa desde ahí por un tubo A á una caja *mn*, colocada sobre la mesa y que sirve de peana. Esta caja sirve al mismo tiempo de sostén y de *distribuidor de aire* para los tubos. Los agujeros en que penetran las embocaduras de los tubos están cerrados por válvulas *s* (fig. 289) que se oponen al paso del fluido ; pero delante de cada tubo hay una tecla *a* que abre la válvula y deja pasar el aire cuando se la aprieta. Cada

válvula tiene un muelle que la levanta automáticamente desde que la tecla deja de apretarla.

295. **Rueda dentada de Savart.** — También se puede aplicar el método acústico utilizando otro instrumento, la rueda dentada de Savart. Los sonidos se producen por medio de un tarjetón aplicado por la mano con fuerza contra los bordes de una rueda metálica dentada, que se hace girar más ó menos de prisa mediante

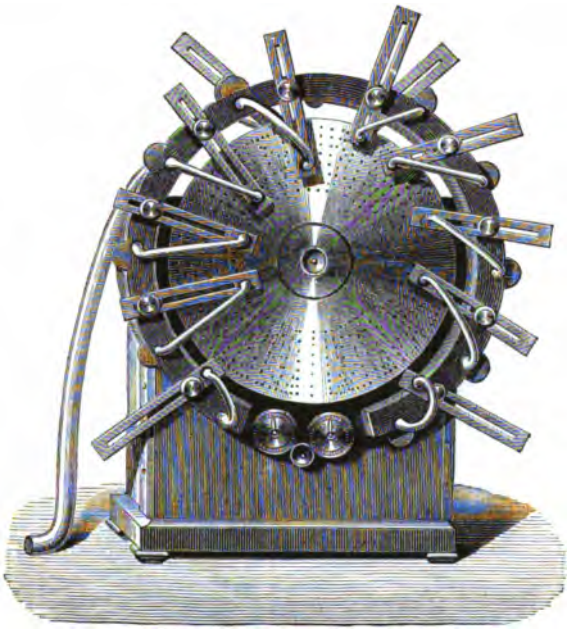


Fig. 287.

una rueda grande de manubrio. Á cada paso de un diente se produce *una vibración doble* : el número de éstas obtenido en un tiempo dado depende al mismo tiempo del número de dientes de la rueda y de su velocidad de rotación; se le mide automáticamente por medio de un contador especial, análogo al de la sirena.

Para obtener *sonidos graves*, Savart reemplazaba la rueda dentada por una sencilla barra de hierro, de 65 centímetros de longitud; mas en ambos casos los sonidos eran de pésima cualidad.

296. **Límite de los sonidos perceptibles.** — Antes de Savart se admitía que el oído deja de percibir los sonidos por debajo de 16 vibraciones dobles por segundo y por encima de 9,000; pero los trabajos de aquel físico probaron que esos límites son demasiado estrechos y que la posibilidad de percibir sonidos más graves ó agudos depende más bien de su intensidad que de su elevación. Por medio de su *rueda dentada* logró hacer perceptibles sonidos agudos de 24,000 vibraciones dobles por segundo y otros graves de 8 vibraciones dobles.

Valiéndose de una serie de diapasones (310) templados en la octava unos de otros, halló Despretz 16 vibraciones dobles como límite de los sonidos graves y 36,850 para los agudos [1].

297. **Método gráfico. — Vibroscopio de Duhamel.** — En cualquiera de los métodos precedentes precisa hacer hablar á un sonido conocido al *unísono* del desconocido, y la apreciación del unísono exige

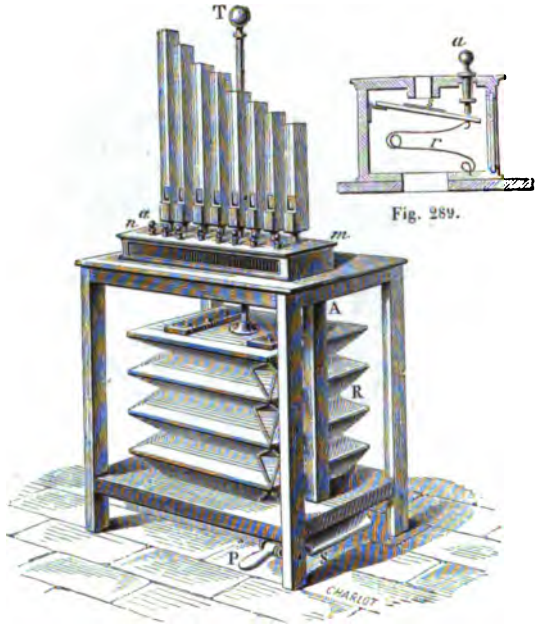


Fig. 288.

en el observador oído ejercitado. El método gráfico no presenta esta dificultad. Consiste, efectivamente, en trazar las vibraciones mismas del cuerpo sonoro en una superficie convenientemente preparada. Después sólo falta contar estas vibraciones, que se hallan inscritas en forma de sinuosidades perfectamente visibles á simple vista. El aparato, llamado *vibroscopio*, que sirve para obtener esta inscripción, así como el método empleado, se deben á Duhamel.

Descripción del vibroscopio. — Este aparato consiste en un cilindro A, de madera ó de metal, fijo en un eje vertical O (fig. 290), de forma de tornillo, y que

1. Esto hace 73 700 vibraciones simples, que corresponden á re_{10} (estando el do_1 representado por 128 vibraciones) (311). Por lo demás la percepción de este sonido extremo, que pasa y con mucho el límite de los musicales, producía en el oído sensación penosa. Según Helmholtz, los sonidos convenientes en música están comprendidos entre 40 y 4000 vibraciones dobles, ó sea una extensión de 7 octavas.

penetra en una tuerca, de manera que, si se le hace dar vueltas con un manubrio, sube ó baja en uno ú otro sentido. Alrededor del cilindro se arrolla una hoja de papel sobre la cual se deposita una capa ligera y no adherente de negro de humo. En esta capa es donde se anotan las vibraciones.

Supongamos, por ejemplo, que el cuerpo sonoro sea una lámina elástica C, sólidamente mantenida por uno de sus extremos. En la otra se coloca un punzón ligero que roza con la superficie del cilindro durante su rotación. Si éste gira sin

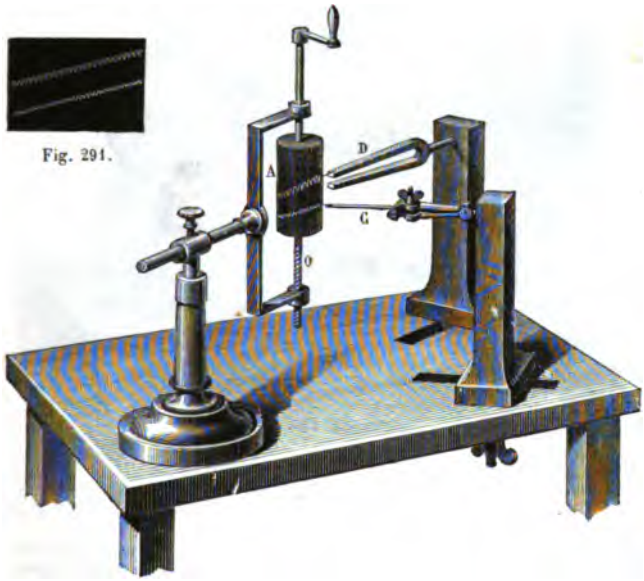


Fig. 290.

que la lámina vibre, el punzón traza en blanco sobre el fondo negro un rasgo helicoidal regular; pero si la lámina vibra, la línea es ondulada, y cada vibración de la placa corresponde á una ondulación. Sólo falta por determinar lo que dura el sonido registrado.

Puede obtenerse esto de varios modos. El más sencillo consiste en comparar la curva trazada por la placa vibrante con otra que se hace paralelamente á la primera mediante un diapasón que produce por segundo un número de vibraciones conocido. Fíjase también un punzón ligero en una de las ramas del diapasón D, y se le pone en contacto con el negro de humo, después de lo cual se hacen vibrar simultáneamente la lámina y el diapasón; entonces los dos punzones trazan hélices ondeadas pero desiguales. Cuando se desarrolla la hoja de papel (fig. 291), se comparan los números de sinuosidades que se corresponden en las dos curvas y se deduce de ahí el de vibraciones por segundo del sonido desconocido.

298. **Fonautógrafo.** — El vibroscopio de Duhamel y los aparatos registradores análogos no permiten más que la inscripción de los movimientos vibratorios simples, tales como los de un diapasón, de una varilla metálica, etc. Con otro aparato registrador, el *fonautógrafo*[1] se anotan las complicadas vibraciones de las ondas sonoras aéreas. Compónese de un ancho paraboloide (de porcelana, loza, ó cualquier otra sustancia poco elástica), cortado en el plano de su foco (fig. 292). Este orificio se cierra con una membrana elástica, provista de un pun-

1. Inventado por un obrero mecánico llamado Scott

zón por su cara externa. Las ondas aéreas, procedentes de un cuerpo sonoro que se hace resonar en la embocadura del paraboloide, son concentradas por las paredes mismas de éste sobre la membrana del plano focal. Éste entra en vibración é inscribe los movimientos complejos que recibe en un cilindro regis-

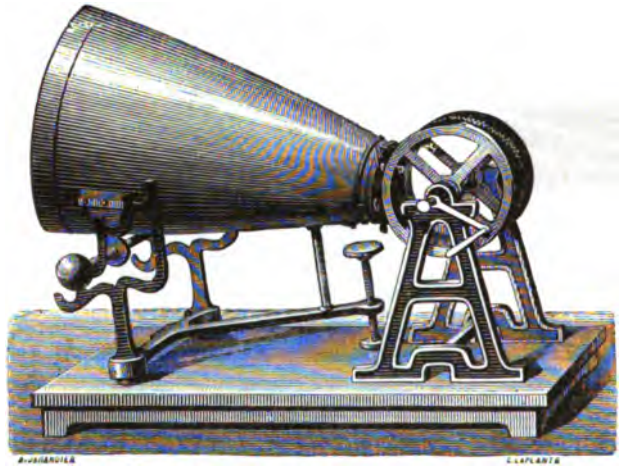


Fig. 292.

trador, que gira uniformemente, gracias á un aparato de relojería, al alcance de un punzón móvil. Ahí se obtienen curvas más ó menos complicadas, que constituyen una especie de *escritura acústica* de los sonidos emitidos por el cuerpo sonoro.

299. **Fonógrafo.** — El *fonógrafo*, inventado por Edison en 1877, puede considerarse como un perfeccionamiento del fonautógrafo. Es un aparato registrador que inscribe las ondas aéreas, no ya en papel ahumado, sino en una hoja metálica : ésta conserva las marcas, que permiten á su vez reproducir á voluntad los sonidos á que corresponden.

El modelo antiguo se componía (fig. 293) de un cilindro de latón A, montado en un eje D, que está provisto de un paso de tornillo en la mitad de su longitud.

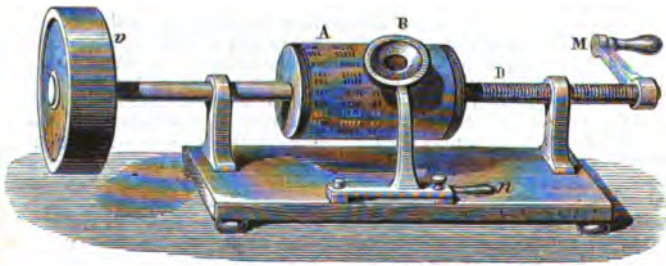


Fig. 293.

En el cilindro se traza una ranura helicoidal del mismo paso que el tornillo D. Por consiguiente, cuando se hace dar vueltas al cilindro por medio de la manivela M, la ranura avanza á cada vuelta una longitud igual á su paso. Sobre la ranura se aplica una hoja de estaño ó de cobre muy delgada, que la envuelve.

Por fin, delante del cilindro hay un *locutorio* ó embocadura B, destinada á recoger y concentrar las ondas sonoras (fig. 294) sobre una placa vibrante *r*, que reemplaza la membrana de Scott; ésta descansa directamente sobre un tubo de caucho *e*, y este último en una lámina *i*, terminada en un punzón de acero. Este punzón debe desempeñar el mismo papel que el del fonautógrafo; va rozando la hoja de estaño y está arreglado de manera que durante su rotación corresponda á la ranura.

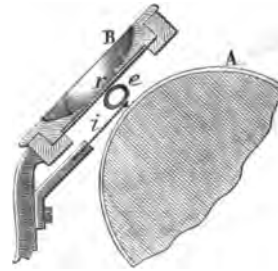


Fig. 294.

Funcionamiento. — Cuando se habla en alta voz delante de la embocadura teniendo cuidado de dar vuelta al mismo tiempo al manubrio M de izquierda á derecha, la placa *r* vibra entonces al unísono de la voz y sus vibraciones se transmiten á la placa *i* y al punzón, que traza en la hoja metálica un punteado más ó menos saliente.

Para hacer hablar al fonógrafo, se empieza por retirar hacia fuera la embocadura B mediante un mango *n*; después se hace girar el manubrio de derecha á izquierda, se vuelve á colocar el cilindro en su primera posición y se pone de nuevo en su lugar la embocadura; entonces se da vueltas, como al principio, de izquierda á derecha: el cilindro adelanta de nuevo, y el aparato se pone entonces á repetir las palabras registradas. En la primera parte de la experiencia, la membrana vibrante actúa sobre el punzón y éste sobre la hoja de estaño; ahora se produce un fenómeno de *reversibilidad*: el punteado de la hoja es lo que actúa sobre el punzón y la lámina *i* de este último sobre el caucho y la placa *r* que, al recibir exactamente las mismas vibraciones que la primera vez, reproduce los mismos sonidos.

300. **Fonógrafo perfeccionado** (modelo de 1889). — La hoja de estaño se reemplaza por un mango de cera *m* ó *m'* (fig. 295), que tiene unos 12 centímetros de longitud y 5 de diámetro. El núcleo CC', un tanto cónico, donde se mete el mango, es soli-

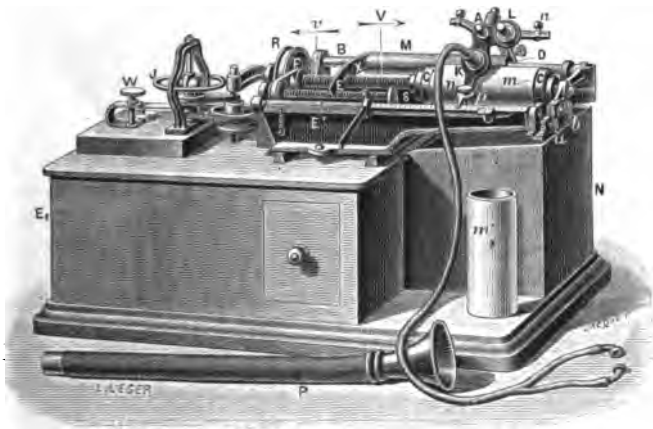


Fig. 295.

dario de un tornillo V dirigido según su eje y cuyo paso es de un cuarto de milímetro. Este tornillo recibe, por la acción de un motor eléctrico contenido en la caja E_1, un movimiento de rotación perfectamente uniforme, de unas 60 á 100 vueltas, según que se trate de inscribir la palabra ó la música.

En FRJW se ven el regulador y los órganos de transmisión. Gracias al brazo X y al tubo M, la pieza LK puede moverse paralelamente á las generatrices del mango, hacia la izquierda ó la derecha de la figura, según que este brazo se hace solidario del tornillo V por medio del peine E, ó del tornillo *v* por E'. La maniobra se efectúa valiéndose de los botones *a*, *b*.

La pieza K, que es muy importante, está formada por una palanca acodillada en ángulo recto, móvil alrededor de la charnela A; los dos brazos de la palanca mantienen respectivamente el inscriptor L y el reproductor K. El disco vibrante

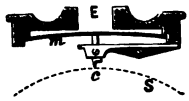


Fig. 296.

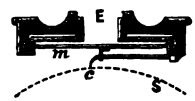


Fig. 297.

m (fig. 296) comunica sus vibraciones á un cuchillito muy cortante *c* por mediación de un trozo de caucho y de láminas que forman muelle. El disco vibrante *m* del reproductor (fig. 297) recibe sus movimientos de una punta roma *c* que sigue los rasgos dejados en la superficie S por el cuchillo.

Los tornillos *n* permiten arreglar la penetración de los punzones en la cera. Es posible suprimir, con un cuchillo especial, las marcas de una inscripción precedente, y hacer que el mango de cera sirva otra vez. La cera retirada cae en el cajón N. La inscripción se efectúa por medio de una bocina P (fig. 295) colocada en la embocadura E. La reproducción se hace biauricular por el uso de los tubos acústicos de horquilla.

301. **Grafofono.** — La inscripción y reproducción de la palabra se han obtenido también por medio del *grafofono*, inventado por el profesor Tainter (fig. 298). El objeto de este físico fué obtener un fonógrafo tan perfecto como el de Edison,

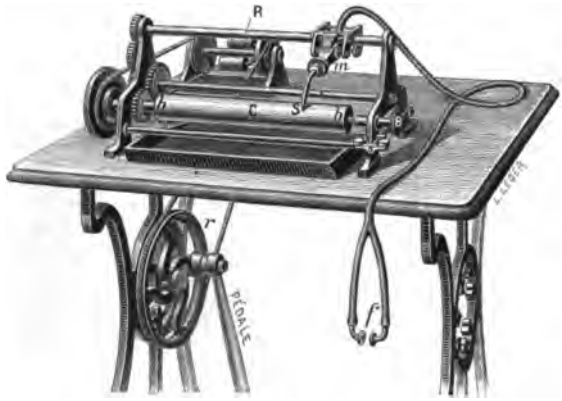


Fig. 298.

pero más sencillo y menos costoso. Así es que recurrió á un mecanismo poco complicado, puesto en acción, sin ayuda de ningún motor eléctrico ó de otra clase, por medio de un sencillo pedal, lo cual permite á la persona más inexperimentada servirse del aparato al cabo de unos cuantos minutos de ensayo.

El grafofono tiene cuatro partes distintas: 1°. el sistema mecánico de arrastre del cilindro; 2°. el sistema registrador; 3°. el sistema reproductor; 4°. el sistema motor y regulador de velocidad R.

El giro del cilindro C se obtiene por medio de un eje horizontal donde está fija

una polea que hace dar vueltas una cuerda movida por el pedal. Dos pequeños botones, colocados á la derecha permiten enlazar ó desenlazar á voluntad. Los cilindros C son de cartón cubiertos de cera y tienen 15 cm. de largo por 32 mm. de diámetro. Su velocidad angular normal es de 180 á 190 vueltas por minuto. El cilindro usado para recibir la inscripción se coloca entre dos piezas semi-esféricas *bb* que garantizan un centro perfecto y una colocación rápida.

Compónese ésencialmente el aparato registrador de una delgada placa de mica donde se fija una lámina cortante que va á aplicarse sobre el cilindro cubierto de cera. La placa de mica está mantenida en su periferia por una armadura de bronce que mantiene un paso de tornillo, el cual va á enlazarse con el tornillo horizontal que sirve para el arrastre longitudinal del sistema registrador.

El *repetidor*, que reemplaza al *registrador* (fig. 299), difiere por completo de este último y se compone de un pequeño aparato de ebonita SM cuya extremidad termina en una ligera punta de acero *a*, articulada como una palanca, uno de cuyos extremos descansa sobre el cilindro y sostiene un hilo tenso *f*, atado en el centro de un disco delgado de celuloide *d*, de 18 á 20 mm de diámetro solamente. Cuando la pequeña punta de acero encuentra á la superficie irregular de la ranura producida en el cilindro por la lámina cortante del sistema registrador, transmite sus vibraciones al pequeño disco de celuloide por medio del hilo tenso y desde allí, siguiendo un tubo de caucho, á dos pequeñas trompetillas que se colocan en los oidos del auditor.

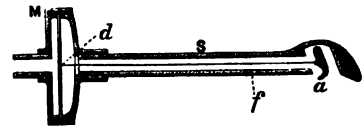


Fig. 299.

El sistema motor que arrastra al cilindro se compone de dos platillos de fricción cubiertos con un cuerpo succedáneo del cuero. Estos dos platillos permanecen en contacto hasta el momento en que la velocidad angular del aparato es suficiente. Á partir de este momento, un regulador de fuerza céntrifuga actúa para separar el platillo fijo en el árbol motor de pedal del platillo colocado en el eje director del grafofono, y de este modo obliga al eje del pedal á dar vueltas sin objeto, no arrastrando al árbol del aparato hasta el momento en que la velocidad se amortigua suficientemente para producir de nuevo el enlace gracias á la aproximación de los platillos.

CLASIFICACIÓN DE LOS SONIDOS MUSICALES.
TEORÍA DE LA ESCALA.

302. **Clasificación de los sonidos. — Intervalos musicales.** — Los métodos precedentes permiten caracterizar cada sonido musical, definiéndolo en cierto modo por el número de vibraciones que le corresponden en el cuerpo sonóro. Tal sonido corresponde á 512 vibraciones simples, tal otro á 860 : se les reconoce por este carácter númerico á través la diversidad de timbre y de intensidad que resulta de la diversidad de los cuerpos sonoros y de los modos de producción.

Este carácter numérico de los sonidos permite también compararlos entre sí y obtener la *razón* ó cociente de dos sonidos, según se haría con dos magnitudes geométricas cualesquiera. La razón de dos sonidos, ó mejor dicho, de los números de vibraciones que los caracterizan, ha recibido el nombre particular de *intervalo*.

Si n y n' son los números de vibraciones de dos sonidos dados, el *intervalo* de ellos es el cociente $\frac{n'}{n}$. Se toma como numerador

el sonido más agudo, de manera que n' es siempre *mayor que n*, y el intervalo resulta por tanto ser un número quebrado mayor que la unidad.

Como la fracción $\frac{n'}{n}$ no cambia de valor cuando se multiplican ó se dividen ambos términos por un mismo número, se nota que el intervalo de dos sonidos no depende *de sus números absolutos de vibraciones*, sino de la razón ó cociente de estos números.

Intervalos musicales. — Como los intervalos de dos sonidos pueden ser cualesquiera, su número es indefinido. Algunos de ellos tienen importancia especial, porque se les emplea exclusivamente en música, y por esto se les llama *intervalos musicales*. Son los siguientes :

1°	el *unísono*	$= \frac{1}{1}$.	5°	la *quinta*	$= \frac{3}{2}$.
2°	la *segunda*	$= \frac{9}{8}$.	6°	la *sexta*	$= \frac{5}{3}$.
3°	la *tercera*	$= \frac{5}{4}$.	7°	la *séptima*	$= \frac{15}{8}$.
4°	la *cuarta*	$= \frac{4}{3}$.	8°	la *octava*	$= \frac{2}{1}$.

Esos son los *intervalos principales;* pero también se usan en música otros complementarios, que se derivan de los precedentes, á saber :

9°	la *segunda menor*	$= \frac{16}{15}$.	10°	la *tercia menor*	$= \frac{6}{5}$.
	la *segunda mayor*	$= \frac{9}{8}$.		la *tercia mayor*	$= \frac{5}{4}$.

Cada vez que dos números de vibraciones están entre sí como 2 es á 1 ó como 3 es á 2, ó como 4 es á 3, se dice, del sonido más agudo, que da la octava, la quinta ó la cuarta del otro; y recíprocamente, si se dice de dos sonidos que forman una cuarta, una tercia mayor..., esto significa que sus números de vibraciones son entre sí como 4 y 3, ó como 5 y 3, y así sucesivamente.

303. **Acordes : acordes consonantes y disonantes. — Acordes perfectos.** — Cuando se producen simultáneamente dos ó más sonidos, separados por intervalos musicales, resulta un *acorde*.

La sensación que produce este fenómeno es ya más ó menos agradable al oído, ya más ó menos desagradable. En el primer caso se dice que el acorde es *consonante* y que es *disonante* en el segundo.

Los acordes más consonantes son los de *octava*, de *tercia mayor* y de *quinta*. Los acordes disonantes son los de *cuarta*, de *sexta*, de *segunda* y de *séptima*.

En general un acorde es *tanto más* consonante cuanto *más pequeños* son los dos términos de la razón que lo define.

Acorde perfecto. — El más agradable de todos los acordes es uno más complejo, formado por la producción simultánea de tres sonidos, en los cuales los dos últimos están separados del primero (sonido fundamental) por los dos intervalos de *tercia mayor* y de *quinta*. Tomando al primero por unidad, los números de vibraciones sucesivos están representados según lo dicho por los quebrados ;

$$1, \quad \frac{5}{4}, \quad \frac{3}{2},$$

ó bien, quitando los denominadores, por los números enteros

$$4, \quad 5, \quad 6,$$

Esto es lo que se llama el *acorde perfecto mayor*, por oposición á otro análogo, que se obtiene sustituyendo una tercia menor en vez de la tercia mayor que forma el primer intervalo. El *acorde perfecto menor* está caracterizado, pues, por los números

$$1, \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{3}{2},$$

ó bien por los enteros

$$10, \quad 12, \quad 15.$$

304. **Armónicos.** — Llámase *sonidos armónicos* ó sencillamente *armónicos*, unos sonidos cuyos números de vibraciones son entre sí como la serie natural de los números enteros 1, 2, 3, 4, 5, 6...

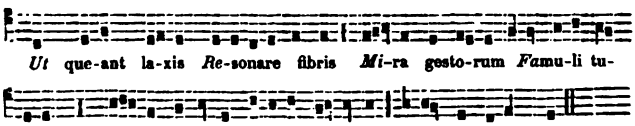
La superposición de dos de estos sonidos produce un acorde tanto más consonante, cuanto más bajos en la serie se les tome. En efecto, el segundo armónico es la octava del primero; el tercero (que equivale á $\frac{3}{2} \times 2$) es su doble quinta; el cuarto (que puede escribirse 2×2) es su doble octava; el quinto (que equivale á $\frac{5}{4} \times 4$) es su cuádruple tercia. Además, los dos primeros armónicos producen la octava; el segundo y el tercero, la quinta; el tercero y el cuarto, la cuarta; el cuarto y el quinto, la tercia. De manera que los armónicos (por lo menos los primeros de la serie) no producen sino acordes : de esto les viene su nombre.

305. **Escala musical. — Gama.** — Llámase *escala musical* á una serie de sonidos, usados en música y separados unos de otros por intervalos musicales.

Estos sonidos se reproducen periódicamente en el mismo orden, por series de siete : cada serie se llama una *gama* [1], y los siete sonidos ó *notas* de cada gama han recibido los nombres de *do*, *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si* [2].

1. Según Helmholtz, el sistema de las gamas, de los modos y de su enlace armónico no se funda en leyes naturales invariables, sino que es, por el contrario, consecuencia de principios estéticos que han variado con el desarrollo progresivo de la humanidad y que todavía variarán.

2. En Inglaterra y Alemania representan las siete notas por las letras C, D, E, F, G, A, B. Este modo de notación fué usado entre los antiguos, y durante la edad media hasta el siglo XI. Un monje benedictino, Guido de Arezzo, modificó entonces la escala musical, y adoptó como nombre de las seis primeras notas las primeras sílabas de seis palabras del himno latino que se cantaba en las iglesias en honra de San Juan. La séptima nota, el *si*, no fué agregada á las primeras hasta mucho más tarde, en 1784, por el músico francés Lemaire. Cuanto á la nota *do*, es la que ha reemplazado poco a poco en el uso del solfeo á la primitiva *ut*, que carece de sonoridad. He aquí el fragmento de himno (anotado en canto llano) de donde se tomaron los nombres de las notas de la escala :



Comparando entre sí los números de vibraciones de las siete notas de la gama, y representando por 1 el del sonido más grave, el *do* fundamental, se encuentra que los demás son :

[A]	Notas.	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
	Números relativos de vibraciones.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

En las gamas sucesivas que constituyen la escala musical, las notas son todas múltiplos, por las potencias crecientes de 2, de las notas del mismo nombre de la gama fundamental.

306. **Intervalos sucesivos de las notas : tonos y semi-tonos.** — Las fracciones del cuadro [A] representan igualmente los intervalos respectivos de las seis últimas notas con relación á la primera. Y si además se buscan los intervalos sucesivos entre ellas, se encuentra

[B]	Notas	*do*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
	Números relativos de vibraciones . .	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Intervalos sucesivos		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.

No hay pues sino *tres* intervalos sucesivos *distintos* entre las siete notas de la gama, á saber $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ y $\frac{16}{15}$. El primero, que es el más extenso, se ha llamado *tono mayor;* el segundo, *tono menor*, y el tercero, que es el más pequeño, *semi-tono mayor*. Puede decirse, en consecuencia, que los intervalos sucesivos de la gama comprenden *dos tonos*, *un semi-tono*, *tres tonos* y un *semi-tono*.

El intervalo del tono mayor al menor es $\frac{81}{80}$: llámasele *coma*. Este es el más pequeño que se considera en música; se necesita un oído tan ejercitado para notarlo, que en la práctica hay la costumbre de no tenerlo en cuenta. Por esto se da el nombre común de *tono* á los dos intervalos $\frac{9}{8}$ y $\frac{10}{9}$, que sólo difieren entre sí un *coma*.

307. **Gama natural. — Transposición musical. — Sostenidos y bemoles.** — Esta gama que empieza por la nota *do* y que por esto se llama *gama de do*, es la *fundamental* en la escala de la música : también se la denomina *gama natural*, por la razón que ahora veremos.

El *do* es la *nota fundamental*. También se la llama la *tónica*, porque da el *tono* á la gama; efectivamente, dícese de un trozo de música que está escrito con las notas de esta gama natural (ó de sus octavas agudas ó graves) cuando se halla *en el tono de do mayor*[1]. La quinta nota, el *sol*, se llama la *dominante*, y la séptima, el *si*, es la *nota sensible*.

Como esta gama natural es insuficiente para las necesidades de la composición musical, se han creado otras mayores que tienen como tónicas las diferentes notas de la gama fundamental.

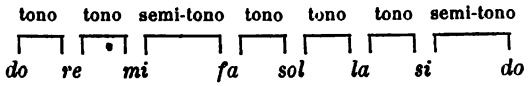
Sostenidos. — Tratemos, por ejemplo, de crear una nueva gama

1. Es de lamentar que sólo exista la palabra tono para designar las dos cosas tan distintas que antes hemos definido

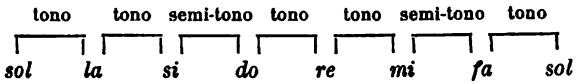
mayor, que tenga como tónica, la quinta de la gama fundamental, es decir, el *sol*. Las notas serán :

[1] *sol la si do re mi fa sol.*

Esta serie de ocho notas no reproducirá *la melodía conocida por el nombre de gama* sino en tanto cuanto los intervalos sucesivos de las ocho notas sean idénticos á los de la gama natural. Ahora bien, los de la gama natural son



y los de la gama nueva



Luego, en esta última el primer semi-tono está bien colocado, es decir entre la tercera y la cuarta nota; pero el segundo semi-tono está mal colocado, puesto que se encuentra entre la sexta y la séptima nota, en vez de hallarse entre la séptima y la octava. De manera que para reconstituir la melodía bastará con *transportar* este segundo semi-tono. Esto se obtiene *sosteniendo*, según la frase usual, la séptima nota, el *fa*. El método consiste en sustituir el *fa* primitivo, llamado *fa natural*, por una nueva nota el *fa sostenido* (que se escribe *fa* ♯), separada del *fa* natural por el intervalo $\frac{25}{24}$. Así se establece, entre esta nueva nota y el *mi* precedente, el intervalo de un *tono*, y entre el *sol* y esta nueva nota el intervalo de un *semi-tono*. Entonces la nueva serie

[2] *sol la si do re mi fa♯ sol,*

constituye una gama mayor *en tono de sol* (*con un sostenido*) idéntico á la gama natural *en tono de do.*

Análogamente se obtendrán seis otras gamas mayores, aplicando esta regla de *transposición* sucesivamente á todas las notas de la gama natural, de quinta en quinta. Se puede enunciarla de esta manera.

Para pasar de una gama mayor á otra mayor también, *que tenga como tónica la dominante de la primera*, basta tomar sucesivamente todas las notas de ésta, *pero sosteniendo la sub-dominante.*

Bemoles. — Hay otra manera de transportar. Tratemos de formar una nueva gama, tomando ahora como tónica la *sub-dominante fa* de la gama natural.

La serie de las notas y de los intervalos será

tono	tono	tono	semi-tono	tono	tono	semi-tono
fa — *sol*	*sol* — *la*	*la* — *si*	*si* — *do*	*do* — *re*	*re* — *mi*	*mi* — *fa*

Aquí lo que permanece en su sitio es el último semi-tono mientras que el primero cambia, retrocediendo un punto hacia la derecha. Para volverlo á su posición normal, es decir entre la tercera y la cuarta nota, se *bemoliza* el *si* : método que consiste en sustituir el *si* primitivo, llamado *si natural*, por una nueva nota, que se denomina *si bemol* (se le escribe *si* ♭), que está separada : 1°. del *si* natural por el intervalo, $\frac{24}{23}$, 2°. del *la* precedente por un *semi-tono*, y 3°. del *do* siguiente por un tono. Entonces se tiene la nueva serie

[2 *bis*] *fa sol la si* ♭ *do re mi fa*,

que constituye una nueva gama mayor (llamada *en fa mayor, con un bemol en la clave*), idéntica á la gama natural en *do mayor*.

Así se formarán análogamente otras seis gamas mayores aplicando sucesivamente, de cuarta en cuarta, á todas las notas de la gama natural, ésta segunda regla de transposición. Se puede formularla de la manera siguiente :

Para pasar de una gama mayor cualquiera á otra mayor, *que tiene como tónica la sub-dominante de la primera*, basta tomar todas las notas de ésta, pero *bemolizando la nota sensible*.

308. **Gamas menores. — Tonos relativos.** — Cada una de las gamas precedentes está caracterizada por un *acorde perfecto mayor*, formado por la superposición de la tónica, de la tercia y de la quinta de la gama. Para la gama de *do mayor*, es el acorde perfecto fundamental *do-mi-sol*; para la gama de *sol mayor*, es el acorde *sol-si-re*$_1$, y así sucesivamente [1].

A cada gama mayor corresponde otra menor, caracterizada por el *acorde perfecto menor*. Así, como el acorde perfecto menor correspondiente al acorde perfecto mayor fundamental es *la-do*$_1$*-mi*$_1$, la gama menor correspondiente á la gama dé *do mayor* tiene como tónica el *la* de ésta. Hállase caracterizada por el lugar del primer semi-tono, que está entre la segunda y la tercera nota, quiere decir entre el *si* y el *do*. Cuanto al segundo semi-tono, queda colocado entre la séptima y la octava nota, lo que exige que la sexta y la séptima sean *sostenidas*. Tiénese pues, la gama siguiente,

la si do$_1$ *re*$_1$ *mi*$_1$ *fa*$_1$ ♯ *sol*$_1$ ♯ *la*$_1$.

que está caracterizada por el acorde perfecto *la-do*$_1$*-mi*$_1$, que es menor, y se dice que este tono de *la menor* es relativo del tono de *do mayor*.

El tono menor *relativo de cada una de las gamas mayores* precedentes se determinará aplicándoles sucesivamente la misma regla.

Observación. — Las gamas menores presentan todas el carácter particular de que la *gama descendente* no es idéntica á la *gama ascendente*, según ocurre con las gamas mayores. Así, para el tono de *la menor*, mientras la gama ascendente es la que hemos definido antes,

la si do$_1$ *re*$_1$ *mi*$_1$ *fa*$_1$ ♯ *sol*$_1$ ♯ *la*$_1$,

1. Marcamos este *re* por un índice (1) á fin de indicar que ya no pertenece á la gama fundamental, sino a la siguiente.

la gama descendente es

$$la_1 \quad sol_1 \quad fa_1 \quad mi_1 \quad re_1 \quad do_1 \quad si \quad la,$$

quiere decir que la sexta y la séptima nota ya no son sostenidas, y que todas las notas vuelven á ser idénticas á las del tono mayor relativo[1].

309. **Gama cromática. — Temperamento.** — Entre una nota cualquiera *sostenida* y la siguiente *bemolizada*, el intervalo es sumamente pequeño; pero no nulo. Es posible convencerse de ello calculando, por ejemplo, los números de vibraciones de un *re* ♯ y de un *mi* ♭. Tiénese

$$re\,\sharp = \frac{9}{8} \times \frac{25}{24} \quad \text{y} \quad mi\,\flat = \frac{5}{4} \times \frac{24}{25},$$

de donde

$$\frac{mi\,\flat}{re\,\sharp} = \frac{2^7}{5^3} \times \frac{128}{125}.$$

Es fácil probar que este intervalo *es mayor* que el coma; luego no se le puede despreciar. Una octava completa se compone, pues, en realidad de las siete notas naturales, *más* siete sostenidos, *más* siete bemoles: en total *veinte y una* notas.

Puédese, al menos teóricamente ejecutar todos estos grados sucesivos con instrumentos de sonido variable, tales como el violín ó el contrabajo; pero tratándose de instrumentos de sonidos fijos, como el piano ó el arpa, la realización de una octava completa no sería práctica, por causa del excesivo número de *teclas* ó *cuerdas* que habría que poner al instrumento. En consecuencia, se ha resuelto confundir el sostenido con el bemol siguiente, de modo que se constituya una gama completa mixta, con doce grados ó intervalos sucesivos, igualmente distantes.

La gama así obtenida se llama *gama cromática*. El intervalo constitutivo de esta gama es el *temperamento* ó *semi-tono medio*. Como hay doce entre el *do* fundamental y el *do* siguiente, este temperamento resulta igual á $\sqrt[12]{2}$ (= 1,059). Se diferencia ligeramente del semi-tono mayor (1,066).

He aquí la serie de las notas de la gama cromática, con los intervalos correspondientes:

do	= 1	*fa* ♯ ó *sol* ♭	= 1,409
do ♯ ó *re* ♭	= 1,059	*sol*	= 1,495
re	= 1,121	*sol* ♯ ó *la* ♭	= 1,584
re ♯ ó *mi* ♭	= 1,187	*la*	= 1,678
mi	= 1,257	*la* ♯ ó *si* ♭	= 1,780
fa	= 1,331	*si*	= 1,888

Por fin, el *do* siguiente es 2, de modo que el intervalo de octava es rigurosamente conservado; el de tercia $\left(\frac{3}{4} = 1{,}250\right)$ y el de quinta $\left(\frac{3}{2} = 1.500\right)$ no experimentan más que alteraciones despreciables.

310. **Diapasón.** — El *diapasón* es un pequeño instrumento por medio del cual se produce á voluntad una nota invariable: úsasele

1. Cuando se quiere indicar con más precisión este regreso de las notas *fa* ♯ y *sol* ♯ á sus valores naturales, se las afecta del signo particular ♮, llamado en música *becuadro*. La gama descendente se escribe entonces así

$$la_1 \quad sol_1\,\natural \quad fa_1\,\natural \quad mi_1 \quad re_1 \quad do_1 \quad si \quad la.$$

Esta forma de la gama menor descendente tiende á caer en desuso. Hoy se prefiere bajar la gama menor exactamente como se la sube y poner

$$la_1 \quad sol_1\,\sharp \quad fa_1\,\sharp \quad mi_1 \quad re_1 \quad do_1 \quad si \quad la.$$

para afinar los instrumentos de música. Consiste en una lámina de acero encorvada sobre sí misma en forma de pinzas (fig. 300). Hácesele vibrar, sea pasando un arco de violín por sus bordes, sea apartando bruscamente sus dos brazos con un cilindro de hierro que se pasa á la fuerza entre ellos, según indica el grabado. Las dos láminas separadas así de su posición de equilibrio vuelven á ella vibrando, y producen un sonido constante para cada diapasón. El sonido se refuerza por *resonancia*, fijando el aparato en una caja de madera blanca abierta por uno de sus extremos.

Fig. 300.

Diapasón normal. — El número de vibraciones de un diapasón varía con la longitud y grueso de sus dos ramas. Por consiguiente, es posible construir instrumentos que emitan una nota cualquiera de la gama; basta arreglarlos con ayuda de la sirena, ó mejor aun por el método gráfico de Duhamel. Llámase *diapasón normal* al que da el *la* de cierta gama que se distingue de las otras, en la escala musical, afectando sus diversas notas con el índice 3 : luego, el diapasón normal da el la_3.

La *normal.* — El número de vibraciones simples del diapasón normal fué primero de 856 por segundo; después ha ido subiendo hasta 880. En 1859 se reunió una Comisión oficial que adoptó un *diapasón normal*, obligatorio en todos los establecimientos musicales de Francia, y que ejecuta 870 vibraciones por segundo. El la_3 fué definido al mismo tiempo, recibiendo el nombre de *la normal* [1].

311. **Notación de las diversas gamas naturales. — Números absolutos de vibraciones.** — Siendo completamente arbitrario el número de vibraciones que corresponde al *do* fundamental, puede admitirse serie indeterminada de gamas. Como punto de partida de la escala musical se ha designado el sonido más grave del *bajo* convirtiéndolo en el *do* de la primera gama, cuyas notas se caracterizan con el índice 1 según consentimiento general [2] : entonces se designan las notas de las gamas más agudas por los índices 2, 3..., y las de las gamas más graves por los índices — 1, — 2.... Así, fa_2 es la octava aguda de fa_1 y fa_{-1} es su octava grave.

Hasta ahora no hemos considerado más que los números de

1. El diapasón normal está depositado en el Conservatorio de música de París.

2. Esta idea fué propuesta por el físico Sauveur, que además tomó como punto de partida de la escala musical un do_{-2} igual á 32 vibraciones simples, lo que daba 512 vibraciones por do_3.

vibraciones relativas; pero es fácil deducir todos los números absolutos del adoptado para el la_3. Por ejemplo, el número de vibraciones de do_3 estára dado por la ecuación

$$\frac{la_3}{do_3} = \frac{5}{3}, \quad \text{de donde} \quad do_3 = \frac{3}{5} \times la^3 = \frac{3}{5} \times 870 = 522 \text{ vibr. simples,}$$

y así sucesivamente para todas las demás notas de la escala musical.

312. **Limites de la escala musical.** — 1°. *Límite instrumental.* — En música se usan notas todavía más graves en dos octavas que el *do*, de Sauveur. Márcase la primera octava inferior do_{-1}... y la octava que está por debajo do_{-2}.... Sus números de vibraciones se deducen fácilmente de los anteriores. Tiénese (en vibraciones simples) $do_{-1} = 65{,}25$ y $do_{-2} = 32{,}625$. Este límite de los sonidos graves está dado por el caño mayor de los grandes órganos.

Los pianos actuales van desde el la_{-2} al do_6 : de manera que su registro comprende algo menos de siete octavas. El límite de los sonidos agudos lo marca la flauta pequeña ó requinto : es el re_6.

Hemos dicho anteriormente (296) que, según Helmholtz, los sonidos de uso conveniente en música van desde 40 vibraciones simples próximamente á 8000. Por consiguiente, la escala musical propiamente dicha no comprende sino siete octavas [1].

2°. *Límite vocal.* — La escala de las voces humanas es más limitada todavía. Va del fa_{-1}, nota extrema del registro de los bajos, al do_6, nota extrema del registro de los sopranos.

CAPÍTULO III

VIBRACIONES DE LAS CUERDAS.

313. **Cuerdas vibrantes.** — **Definiciones** — Llámase *cuerdas* en acústica á unos cuerpos filiformes, de metal ó de tripa, que son *elásticos por tensión.*

Provócanse en las cuerdas dos clases de vibraciones : unas *transversales*, que se efectúan en una dirección perpendicular á aquéllas; otras *longitudinales*, en el sentido de su longitud. Las primeras se provocan sea frotando las cuerdas con un arco como en el violín, sea pulsándolas como en el arpa ó la guitarra. Cuanto á las longitudinales, se obtienen frotando las cuerdas en el sentido de su longitud con un pedazo de tela espolvoreado con colofana.

1. El sonido de 73 700 vibraciones simples, indicado por Despretz como límite superior de los sonidos perceptibles, afecta dolorosamente el oído, aunque carezca de toda aptitud para la música.

314. **Sonómetro.** — El *sonómetro* es un aparato que sirve para estudiar las vibraciones transversales da las cuerdas. También se le llama *monocordio*, porque no tiene sino una cuerda.

Compónese de una caja sonora de madera delgada, que tiene por objeto reforzar el sonido. En esta caja hay dos caballetes fijos A y B (fig. 301), que distan entre sí un metro. Entre ellos se coloca una escala dividida en milímetros, y á derecha é izquierda de esta escala hay marcadas en la caja dos series de divisiones, que marcan, una la gama verdadera ó *diatónica*, y la otra la gama *cromática*. Por los caballetes pasan dos cuerdas : una. *m*, se arrolla por un extremo sobre

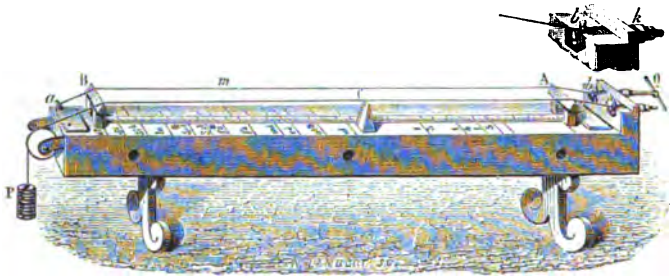


Fig. 301.

un perno de hierro *a*, que es fijo, y por el otro en el perno *b*, enlazado con un tornillo horizontal; se le hace retroceder más ó menos dando vueltas á una tuerca *k* por donde pasa el tornillo, de modo que se tienda la cuerda á voluntad. La segunda cuerda, fija del mismo modo por su extremidad *r*, pasa su otra punta por una polea, y allí se cuelgan de ella pesos de plomo P, que se van aumentando hasta darle la tensión requerida. Por fin, un caballete móvil C puede correr á lo largo de la cuerda de manera que varíe su longitud.

La primera cuerda *m* emite sonido constante, determinado por tensión invariable; con él se comparan después los que produce la otra cuerda, á medida que se modifica su tensión ó la longitud. Ó bien pasan las dos cuerdas cada una por una polea, y entonces las tienden pesos iguales ó que están entre sí en una relación determinada.

315. **Leyes de las vibraciones transversales.** — 1°. *Enunciado :*

1°. *Siendo constante la tensión, el número de vibraciones que ejecuta una cuerda en un segundo está en razón inversa de su longitud.*

2°. *Siendo iguales todas las circunstancias, el número de las vibraciones está en razón inversa del radio de la cuerda.*

3°. *El número de las vibraciones de una cuerda es directamente proporcional á la raíz cuadrada del peso que la tiende.*

4°. *Dada igualdad de circunstancias, el número de las vibraciones de*

una cuerda es inversamente proporcional á la raíz cuadrada de su densidad.

2°. *Fórmula.* — Estas leyes fueron descubiertas experimentalmente por Mersenne, y explicadas después por Taylor, quien obtuvo la fórmula siguiente, que las comprende todas :

$$[1] \qquad n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}},$$

en la cual n representa el número de vibraciones simples por segundo, l la *longitud* de la cuerda, esto es, la parte vibrante comprendida entre los dos caballetes A y B (fig. 301), r el radio de la sección de la cuerda, P el peso que la tiende, y por fin d el peso específico de la sustancia, y π la relación de la circunferencia al diámetro.

En esta fórmula, P debe ser contado en kilogramos, r y l en decímetros.

3°. *Demostración.* — *Ley de las longitudes.* — Si se hace vibrar la cuerda de un sonómetro, primero en su entera longitud, y después dándole por medio de un caballete móvil longitudes que estén en razón inversa de los intervalos de la gama, es decir 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$ y $\frac{1}{2}$, se obtienen sucesivamente todas las notas de la gama, lo cual prueba la primera ley.

Ley de los diámetros. — Se demuestra esta ley tendiendo igualmente en el sonómetro dos cuerdas de la misma sustancia, cuyos diámetros sean, por ejemplo, 3 y 2. Ahora bien, haciéndolas vibrar, la segunda da la quinta de la primera : luego produce 3 vibraciones mientras que la primera da 2.

Ley de las tensiones. — Habiendo colocado en el sonómetro dos cuerdas idénticas, se las tiende por medio de pesos que estén entre sí como 4 y 9. Ahora bien, la segunda da la quinta de la primera; de donde se deduce que sus números de vibraciones están entre sí como 2 y 3, quiere decir, como las raíces cuadradas de las tensiones. Si los dos pesos fueran entre sí como 16 y 25, se obtendría la tercia mayor $\frac{5}{4}$.

Ley de las densidades. — Colócanse en el sonómetro dos cuerdas del mismo radio, pero de densidades diferentes d y d'. Habiéndoseles dado la misma tensión, se pasea bajo la más densa el caballete móvil, hasta ponerla al unísono con la otra cuerda. Sean entonces l y l' las longitudes de estas dos cuerdas que emiten la misma nota n; hállase que el cociente $\frac{l}{l'}$ es igual á $\sqrt{\frac{d}{d'}}$. Ahora bien, sea n' la nota que emitiría la cuerda más densa si se le diera la misma longitud l que á la otra cuerda; es fácil determinar n' según la ley de las longitudes; debe resultar $\frac{n'}{n} = \frac{l'}{l}$: como la experiencia ha dado $\frac{l'}{l} = \sqrt{\frac{d'}{d}}$, se deduce que $\frac{n'}{n} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$.

316. **Nodos y líneas nodales. — Sonidos armónicos de las cuerdas.** — Cuando un cuerpo sonoro vibra, no sólo lo hace en su conjunto, sino que se divide general-

mente en cierto número de partes alícuotas, cada una de las cuales está animada de vibraciones que le son propias. Entre estas porciones vibrantes existen puntos ó líneas *relativamente fijas*, *puntos* y *líneas* llamados *nodales*. Las partes vibrantes comprendidas entre dos líneas nodales ó dos nodos consecutivos se llaman *curvaturas* ó *concameraciones*. El centro de una curvatura recibe el nombre de *vientre de vibración;* ahí es donde éstas alcanzan su máximum de amplitud.

Estas cuerdas vibrantes presentan ejemplos curiosos de nodos y vientres cuando no se hace vibrar más que una parte alícuota de su longitud, es decir, un tercio, un cuarto, un quinto. Para ello se fija la cuerda en sus dos extremos y se hace resbalar debajo un pequeño caballete, parándolo sucesivamente en el tercio, el cuarto y el quinto de la cuerda. Hallándose el caballete en el tercio, según indica la figura (302, I), se hace vibrar la porción BD con un arco de violín; la otra porción AB se subdivide entonces espontáneamente en dos partes AC

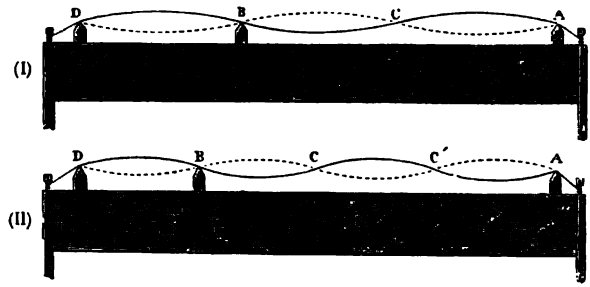


Fig. 302.

y CB, que vibran separadamente, permaneciendo sensiblemente fijo el punto C. En efecto, si se colocan marcas de papel, una en C, otra entre B y C, y una tercera entre C y A, la que se encuentra en C no experimenta sino ligera sacudida mientras que las otras dos son lanzadas á lo lejos. Hay pues un nodo en el primer punto y vientres en los otros dos. Si el caballete B está en la cuarta parte de la cuerda, se producen entre A y B dos nodos y tres vientres (fig. 302, II); si está en la quinta parte, fórmanse entre los mismos puntos tres nodos y cuatro vientres, y así en lo sucesivo.

Cuando una cuerda algo larga vibra enteramente, un oido experto distingue, á más del sonido fundamental, los *armónicos* 2, 3, 4 y 5.

317. **Vibraciones longitudinales de las cuerdas.** — Las leyes de las vibraciones longitudinales de las cuerdas han sido descubiertas por el cálculo. Algunas son análogas á las de las vibraciones transversales y están contenidas en una fórmula análoga:

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{gE}{\pi d}}.$$

En esta fórmula, los coeficientes n, r, l, g y d tienen el mismo significado que en la fórmula de las vibraciones transversales, representando E el *coeficiente de elasticidad* de la cuerda. Llámase así al *peso con que habría que tender la cuerda para que se alargara una cantidad igual á sí misma* (prolongación que no puede obtenerse nunca, pues la ruptura ocurre mucho antes). Como este coeficiente es siempre un número considerable respecto del coeficiente P de las variaciones transversales, resulta de ahí que para una misma cuerda, las vibraciones longitudinales son mucho más rápidas que las transversales: ó de otro modo, una cuerda que vibra *longitudinalmente* emite sonidos mucho más agudos que cuando vibra *transversalmente*.

CAPÍTULO IV

VIBRACIONES DEL AIRE EN LOS TUBOS SONOROS.

318. **Tubos sonoros : Definiciones.** — Llámase *tubos sonoros* á unos tubos de paredes resistentes, donde se producen sonidos haciendo vibrar la columna de aire contenida en ellos.

Si no se hiciera más que soplar en los tubos, no habría sonido, sino únicamente un movimiento continuo progresivo del aire. Para que se produzca el sonido precisa excitar en el aire, por un medio cualquiera, sucesión rápida de impulsiones periódicas, que se comuniquen á toda la columna. De aquí la necesidad de hacer al tubo sonoro una *embocadura*, quiere decir, una abertura de forma conveniente para que el aire que se sopla no pueda entrar más que por intermitencias y no de manera continua. Según la disposición adoptada para poner de este modo en vibración el aire, los tubos sonoros se dividen en dos categorías : *tubos de boca* y *tubos de lengüeta.*

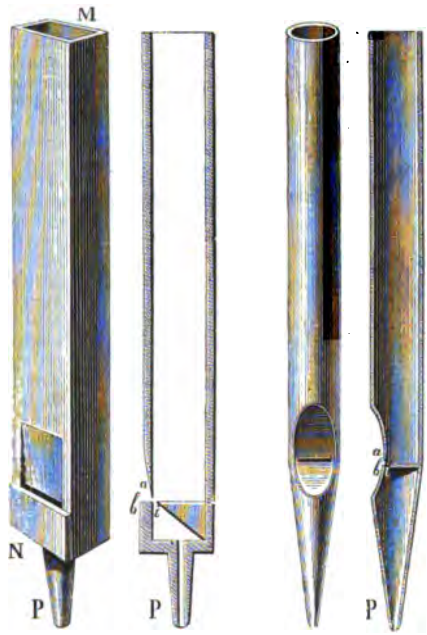


Fig. 303. Fig. 304.

319. **Tubos de boca : Descripción y funcionamiento.** — Los tubos llamados *de boca* son de madera ó de metal, prismáticos ó cilíndricos, y siempre de gran longitud comparada con su sección transversal (fig. 303 y 304). Tienen una embocadura fija en todas sus partes. El extremo inferior, P*i*, por donde llega el aire, es el *pie*, que sirve para colocar el tubo sobre un sistema de fuelles. Á su salida del pie, el aire pasa por una hendidura estrecha *i*, que se llama la *luz*. Frente á ésta se halla, en la pared opuesta, una abertura transversal que es la *boca ;* su borde *a*, cortado en forma de bisel, es el *labio superior* y el borde *b* el *labio inferior :* lo que constituye la embocadura es el conjunto de todas estas piezas.

La corriente de aire que pasa por la luz se rompe contra el labio superior, se comprime allí y, por un efecto de elasticidad, obra de rechazo sobre la corriente que continúa llegando y la detiene ; pero esta parada no se efectúa sino por espacio de tiempo muy corto, porque el aire sale por la boca y la corriente que llega del pie vuelve en seguida. De ahí pulsaciones que se transmiten al aire en el tubo y originan una serie de semi-ondas sonoras, alter-

nativamente condensadas y dilatadas. Estas ondas son tanto más rápidas cuanto mayor es la velocidad de la corriente, y cuanto más cerca de la luz se encuentra el labio superior. Para hacer puro el sonido, hay que establecer cierta relación entre las dimensiones de los labios, la abertura de la boca y la magnitud de la luz; además, el tubo debe tener mucha longitud relativamente á su sección.

En la *flauta ordinaria* la embocadura consiste en una sencilla abertura lateral circular. Gracias á esta disposición que se da á los labios, la corriente de aire va á romperse contra los bordes de la abertura. Lo mismo ocurre con la *flauta de Pan* y con una llave perforada en que se silba.

La fig. 304 representa la embocadura de un tubo cilíndrico muy usado en los órganos. Las mismas letras indican las mismas partes que en la figura 303.

320. **Tubos de lengüeta : Descripción y funcionamiento.** — La columna de aire es puesta en vibración en estos tubos por medio de una pieza elástica especial llamada *lengüeta*. Hay dos especies, la *fija* y la *libre*.

Lengüeta fija. — Compónese de una pieza de madera ó de metal *a* (fig. 305) trabajada en forma de cuchara en el sentido de su longitud, y fija en una especie de tapón K taladrado por un agujero que hace comunicar la cavidad de *a* con un largo tubo T. Dicha pieza *a* lleva una lámina *l*, de latón, delgada y flexible, que tapa su entrada y que es lo que en propiedad debería llamarse *lengüeta*. En su posición ordinaria, ésta se encuentra algo apartada de los bordes de *a*; pero puede acercarse fácilmente y cerrar el conducto. Por fin, un alambre *br* se aplica por su parte inferior, que está encorvada, sobre la lengüeta, á fin de regular su alejamiento y acortar ó alargar más ó menos la parte vibrante, lo cual permite aumentar ó disminuir el número de sus vibraciones.

Este aparato puede adaptarse en lo alto de un tubo rectangular ó *porta-viento*, fijo en la caja de los fuelles. Cuando llega el aire por ese conducto pasa primero por el conducto de *a*, encaminándose al tubo T; pero luego, como la velocidad de la corriente se acelera, la lengüeta va á chocar con los bordes del conducto y cierra el paso al aire; después la lengüeta vuelve sobre sí misma, es arrastrada de nuevo cuando la corriente pasa, y así sucesivamente: de aquí resulta un sonido tanto más agudo cuanto más rápida es la corriente de aire y más numerosas las vibraciones de la lengüeta.

Fig. 305.

Fig. 306.

Lengüeta libre. — Grenié inventó en 1810 una especie de lengüeta que se llama *libre* porque penetra en el conducto de *a* rozando sus bordes y oscilando sin dificultad de dentro á fuera. Aquí la pieza *a* consiste en una pequeña caja de madera *a* (fig. 306), cuya pared anterior es una placa de latón. En medio de ésta se encuentra una abertura longitudinal y dentro la lengüeta *l*, que puede inclinarse libremente hacia delante y hacia atrás para dar paso á la corriente de aire, que corta cada vez que rasa los bordes de la hendidura. Un alambre *r* sirve para determinar la longitud de la parte vibrante de la lengüeta.

321. **Leyes experimentales de los tubos sonoros.** — Las leyes que determinan los sonidos emitidos por los tubos sonoros han sido descubiertas sucesivamente por el P. Mersenne y por Daniel Bernouilli. Se aplican exclusivamente á los tubos muy estrechos.

Ley del P. Mersenne (*Ley de los tubos semejantes*). — *Dos tubos semejantes emiten sonidos cuyos números de vibraciones están en razón inversa de las dimensiones homólogas.*

Por ejemplo, si se hace que hablen sucesivamente dos tubos semejantes (fig. 307) cuyas dimensiones homólogas están en la relación

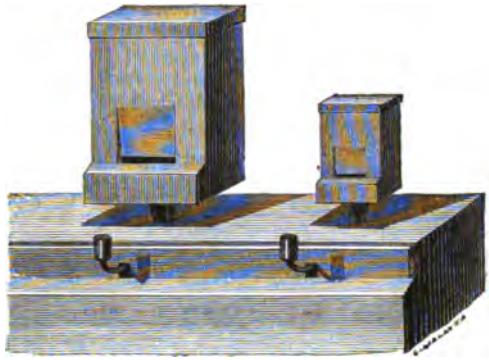


Fig. 307.

de $\frac{1}{2}$, el más pequeño emitirá un sonido en la octava aguda del sonido que emite el mayor.

Leyes de Bernoulli. — I. Caso de los tubos abiertos. — 1°. *Ley de los armónicos. — Un mismo tubo abierto puede emitir una serie de sonidos armónicos cuyos números de vibraciones sean entre sí como la serie de los números naturales.*

Esto quiere decir que si se representa por 1 el sonido fundamental, los que vienen después son sucesivamente 2, 3, 4, 5, 6, 7... : esta es la serie completa de los armónicos del sonido fundamental.

2°. *Ley de las longitudes. — En tubos semejantes, pero desiguales, los números de las vibraciones de los armónicos del mismo orden están en razón inversa de las longitudes.*

Esta ley no es evidentemente sino un caso particular de la del P. Mersenne.

II. Caso de los tubos cerrados. — 1°. *Ley de los armónicos. — Un mismo tubo cerrado puede emitir una serie de sonidos armónicos cuyos números de vibraciones varien como la serie de los números impares.*

Esto quiere decir que si se representa por 1 el número de las vibraciones del sonido fundamental, los de los otros sonidos emitidos estarán expresados por 3, 5, 7... Esta es únicamente la serie de los armónicos de orden impar, y hágase lo que se quiera no es posible sacar del tubo los otros armónicos.

2°. *Ley de las longitudes. — El sonido fundamental emitido por un tubo cerrado es el mismo que el sonido fundamental de un tubo abierto de doble longitud.*

Esta última ley se demuestra por medio de un tubo abierto en sus dos extremos, provisto en su centro de un diafragma de corredera y taladrado por una abertura cuadrada igual á la sección del tubo

(fig. 308). Cuando está dentro el diafragma, el tubo queda abierto en toda su longitud; y se halla cerrado en su centro cuando el diafragma tiene la posición que indica el dibujo. En este caso se obtiene el sonido fundamental de un tubo cerrado de longitud VN. Luego, cuando el diafragma está dentro, se obtiene el sonido fundamental de un tubo abierto de doble longitud VV'. Luego, en ambos casos el sonido es idéntico.

Fig. 308.

3°. *Corolarios.* — De esta última ley se deducen los corolarios siguientes, que habrían podido servirle de enunciado :

I. El *sonido fundamental* de un tudo cerrado está *en la octava grave* de un tubo abierto *de la misma longitud.*

II. *Dado un armónico de la misma clase*, el número de las vibraciones de un tubo cerrado es *mitad* del de un *tubo abierto de longitud idéntica.*

322. **Nodos y vientres de vibración.** — La experiencia prueba que cuando un tubo *habla*, existen en la columna de aire vibrante, de distancia en distancia, secciones fijas llamadas *nodos*, y que entre dos nodos consecutivos hay siempre una sección donde el movimiento vibratorio del aire alcanza un máximum : esto es un *vientre.* Además, el carácter *experimental* de los nodos es que el aire sufre en ellos *variaciones continuas de presión y de densidad*, mientras que el de los vientres es que el aire vibra allí constantemente *sin cambiar* de presión ni de densidad.

Demostración experimental. — Varias experiencias permiten demostrar la existencia de los nodos y de los vientres de vibración en los tubos sonoros, así como determinar su carácter mecánico.

1°. Pégase una membrana de badana sobre un anillo de cartón sostenido por tres alambres, á manera de platillo de balanza, después se echa arena sobre la badana y se baja todo enteramente por la parte interior de un tubo, á medida que éste habla (fig. 309). Pues bien, de distancia en distancia se observa que los granos de arena permanecen inertes sobre la badana : ahí están los nodos; mientras que en las posiciones intermedias dichos granitos son lanzados con más ó menos viveza por las vibraciones que la membrana recibe del aire.

2°. Practícanse en las paredes de un tubo sonoro agujeros que es posible abrir ó cerrar á voluntad por medio de obturadores movibles alrededor de tornillos (fig. 310). Como la densidad del aire es la misma de fuera en las partes correspondientes á los vientres, si se hace un agujero frente á éstos, el sonido no experimenta modificación ninguna. Por el contrario, frente á los nodos, donde la densidad del aire es variable, el sonido cambia enteramente apenas se practica un agujero, porque entonces la capa interior se pone á la presión atmosférica, toma densidad constante y en consecuencia se forma un vientre donde habla un nodo.

3°. *Llamas manométricas.* — *Experimentos de Kœnig.* — En una de las paredes de un tubo rectangular se encuentra una cámara P, á la cual llega gas del alumbrado por un conducto de goma elástica S (fig. 311). De esta cámara salen

otros tres conductos análogos *a*, *a*, *a*, que llevan el gas á número igual de cápsulas fijas en la pared anterior del tubo, y en cada una de las cuales hay un mechero de gas. Si una vez encendidos los tres mecheros, se hace emitir primeramente al tubo el sonido fundamental, A y C arden tranquilamente mientras que B se apaga; pues bien en B hay un nodo y las variaciones continuas de presión y de densidad que ahí ocurren son las que hacen vibrar la membrana de la cápsula B y apagan el gas soplándolo[1].

Si se repite la experiencia ace-

Fig. 309.

Fig. 310.

Fig. 311.

lerando la corriente de aire, de modo que se obtenga el sonido 2, ya no es B el mechero que se apaga sino los otros dos, A y C. Esto quiere decir que en B hay un vientre y en A y C nodos.

Observación general. — En todas estas experiencias se observa que dado un mismo tubo, abierto ó cerrado, sea cual fuera el número de los nodos, éstos se encuentran siempre equidistantes unos de otros para un mismo armónico emitido y que en mitad de la distancia de dos nodos consecutivos hay siempre un vientre.

323. **Fórmulas de los tubos sonoros.** — La disposición de los nodos y vientres en los tubos que hablan puede ser determinada por la experiencia, deduciéndose de ahí, no sólo la explicación de las leyes experimentales de los tubos, sino además leyes generales que las abarcan todas.

Pruébase que la columna de aire que vibra en un tubo cerrado está siempre dividida por nodos y vientres de vibración en un número *impar* de partes igua-

1. Se ha dado á este fenómeno el nombre de *llamas manométricas* por causa de las variaciones de presión que experimentan en el aparato de Kœnig.

les entre sí, llamadas á veces curvaturas ó *concameraciones* (fig. 312). La concameración es igual al cuarto de la longitud de onda completa. En un tubo abierto la columna de aire vibrante se subdivide en un número par de concameraciones.

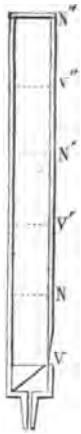


Fig. 312.

Así pues, representando por L la longitud del tubo, por λ la longitud de la onda completa, y por P un número entero cualquiera, de modo que $2p$ sea un número par y $2p+1$ un número impar, es posible expresar los hechos anteriores por las relaciones siguientes:

[1] para los tubos cerrados $\quad L = (2p+1)\frac{\lambda}{4}$,

[2] y para los tubos abiertos $\quad L = 2p.\frac{\lambda}{4}$, ó $L = p.\frac{\lambda}{2}$.

Se ha visto que la longitud de onda λ está enlazada con la duración de la vibración T y con la velocidad del sonido (en el gas que vibra) por la ecuación de definición $\lambda = VT$. Llamando n al número de vibraciones por segundo que caracteriza al sonido, se tiene evidentemente

$$n = \frac{1}{T}, \quad \text{de donde} \quad T = \frac{1}{n} \quad \text{y} \quad \lambda = \frac{V}{n}.$$

Reemplazando en las fórmulas [1] y [2], λ por un valor $\frac{V}{n}$, resulta

$$L = (2p+1)\frac{V}{4n} \quad \text{y} \quad L = p\frac{D}{2n}.$$

De donde se deducen las relaciones definitivas:

[1 *bis*] para los tubos cerrados $\quad n = \frac{(2p+1)V}{4L}$,

[2 *bis*] para los tubos abiertos, $\quad n = \frac{pV}{2L}$.

Sería fácil deducir de estas dos fórmulas todas las leyes de Mersenne y de Bernoulli enunciadas precedentemente.

Observación. — Queda por explicar la producción de los nodos y de los vientres de vibración. No es posible efectuarlo con rigor sino recurriendo al *principio de las interferencias*. De ahí es de donde se puede deducir una teoría completa de los tubos sonoros.

324. **Principio de las interferencias.** — Repitamos el sencillo experimento expuesto antes (278). Supongamos que en vez de dejar caer una sola piedra en un punto de un estanque tranquilo, arrojemos dos, en puntos poco distantes. Cada piedra dará origen á un sistema de ondas circulares, que se propagará separadamente en la superficie del agua; y estos dos sistemas se encontrarán necesariamente, combinándose en su camino. Los puntos de cruce recibirán á la vez dos impulsos, que si son del mismo sentido *se suman*, mientras que si son de sentidos contrarios *se restan*.

En el caso particular de que ambas piedras caigan, en O y O' (fig. 313) al mismo tiempo y desde la misma altura, quiere decir, en que los dos movimientos vibratorios empiecen en el mismo instante y con la misma amplitud, el punto I_0, que está en medio de la distancia de los centros, recibe siempre de cada uno de ellos movimientos de sentido idéntico y su movimiento vibratorio *será máximo;* lo mismo ocurrirá con todos los puntos de la perpendicular $H_0\ I_0\ K_0$, levantada en el centro de la línea de los centros. Pero á derecha é izquierda de esta línea central se encontrarán otros puntos que están más lejos de uno de los centros de vibración que del otro; si la diferencia entre estas distancias, ó, como se dice, *la diferencia de andar*, es *un número impar* de semi-longitudes de onda, el movimiento quedará destruido allí, porque las ondas circulares chocarán siempre con velocidades iguales y contrarias: *de modo que en esos puntos el agua permanecerá*

en reposo; si la *diferencia de marcha* es *un número par* de semi-longitudes de onda, las ondas circulares se encontrarán ahí, lo mismo que en la línea central, con velocidades iguales y del mismo sentido, por lo cual se sumarán sus movimientos : el agua tendrá en esos puntos *un movimiento máximo.* Todos los puntos de las dos curvas H_1 I_1 K_1, situadas á ambas partes de la línea central, se encuentran en el primer caso y permanecen perpetuamente en reposo, no obstante la agitación que los rodea ; todos los de las dos curvas H_2 I_2 K_2 están perpetuamente en estado de agitación máxima, como los de la línea central H_0 I_0 K_0.

Franjas. — Estas líneas y las demás análogas obtenidas por las intersecciones sucesivas de las diferentes ondas circulares se llaman *franjas.* Los círculos negros de la figura 313 representan ondas hinchadas y los puntuados indican

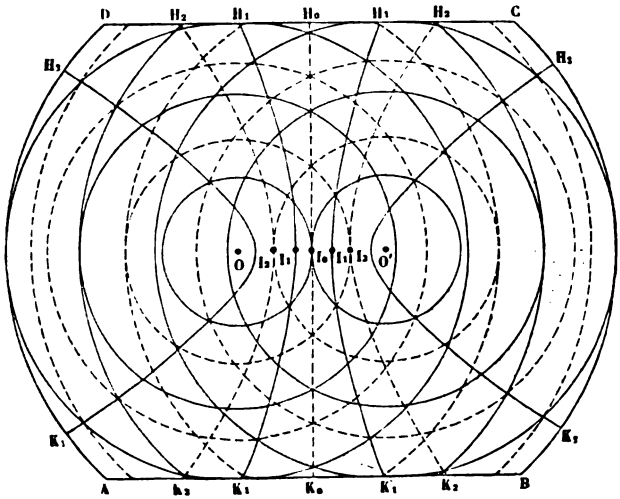


Fig. 313.

ondas deprimidas. Dondequiera que se cortan dos círculos de la misma especie hay máximum de movimiento y los lugares geométricos de estos puntos son las *franjas de movimiento*, que se indican con las líneas de trazos H_0 K_0, H_2 K_2... Dondequiera que dos círculos de especie contraria se cortan, hay destrucción de movimiento : el lugar de los puntos donde esta destrucción ocurre constituye las *franjas de reposo*, que están representadas por las líneas llenas H_1 K_1, H_3 K_3. Se demuestra que ambas son *hipérboles* que tienen como focos comunes los dos centros de agitación O y O' y como ejes la línea OO', y después la franja central H_0 K_0.

Dondequiera que hay suma ó resta de movimiento, se dice en general que se produce una *interferencia* de éstos, expresión que se aplica en particular al caso en que, por efecto de la resta, hay *destrucción completa* del movimiento ó sea reposo absoluto, y el principio de las interferencias consiste en esta curiosa proposición — consecuencia directa del análisis anterior, — á saber que *movimiento añadido á movimiento puede producir reposo.*

325. **Aplicación del principio de las interferencias á las ondas sonoras.** — Los mismos fenómenos se producen en el espacio con las ondas sonoras aéreas que en el plano anterior. Dos cuerpos sonoros puestos en vibración al mismo tiempo, con análoga intensidad y velocidad (quiere decir al *unísono*) dan origen á dos sistemas de ondas esféricas, que se propagan en el aire á la manera que las ondas planas líquidas en la superficie del agua. Son alternativamente condensadas y dilatadas, de tal manera que si se representa gráficamente el estado vibratorio

del aire en un instante dado, sobre un radio Ox emanado de uno de los centros de vibración, se tendrá la curva sinuosa *a a a a* de la figura 314, I. Al cabo de un tiempo $\frac{T}{2}$, igual á la duración de una vibración simple, el estado vibratorio en el mismo radio será exactamente inverso : lo indica la línea de puntos *bbbb* de la figura 314, II. Así ocurrirá con las ondas aéreas emanadas del otro centro de vibración. Estas ondas *interferirán* necesariamente de la misma manera que las acuosas. Dondequiera que se encuentren dos ondas condensadas ó dos dila-

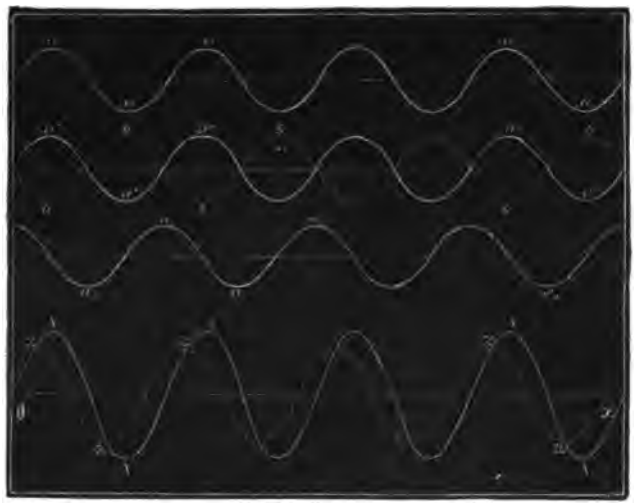


Fig. 314.

tadas, hábra máximo de movimiento : así los movimientos concordantes *aaa* (fig. 314, I) y *a'a'a'* (fig. 314, II) darán el movimiento resultante máximo AAAA (fig. 314 IV). Dondequiera que se encuentren dos ondas de especie opuesta, habrá por el contrario destrucción de movimiento : así, los movimientos discordantes *aaa* (fig. 314, I) y *bbb* (fig. 314, II) producirán el movimiento nulo representado por la recta Ox (fig. 314, IV)[1]. Será pues posible enunciar esta curiosa proposición, que constituye la aplicación del principio de las interferencias á las ondas sonoras, á saber : que *sonido sumado con sonido produce silencio.*

El lugar del espacio en que el movimiento, y por tanto el sonido, es destruído, constituye la *franja silenciosa;* el lugar en que el movimiento, y por tanto el sonido, es reforzado, constituye la franja *sonora.* Aquí las franjas no son líneas : la central es un *plano perpendicular* á la línea de los centros sonoros, y las laterales son *hipérboles de revolución*, que tienen como curvas meridianas otras hipérboles análogas á las representadas en la figura 313.

326. **Teoría de los tubos sonoros.** — El principio de las interferencias sonoras ha podido demostrarse experimentalmente por medio de algunas experiencias de clase[2]; pero la verdadera demostración del

1. La curva *aaaa* (fig, 314, IV) representa un caso intermedio de interferencia : es el movimiento resultante de dos movimientos *aaa* y $a_1\ a_1\ a_1$, cuya diferencia de fase no es un número exacto de semi-longitudes de onda.

2. Pueden citarse las de Hopkins, de Lissajous, de Helmholtz, de Kœnig, etc. Véase Chappuis y Berget, *Leçons de Physique générale*, t. III.

principio resulta de la teoría de los tubos sonoros y de la explicación de las *pulsaciones*.

Existencia de los nodos y de los vientres de vibración. — Dentro de un tubo sonoro que habla se propagan dos especies de ondas sonoras : 1°. las ondas *directas*, que proceden de un sonido originado en la embocadura del tubo ; 2°. las ondas *reflejadas*, que se deben á la reflexión del sonido, sea en el fondo sólido de los tubos cerrados, sea en la masa de aire ilimitada que está en el orificio de los tubos abiertos. En el primer caso, la reflexión de las ondas se efectúa con un cambio de signo en su velocidad de vibración ; en el segundo, sin cambio alguno. El sistema de ondas reflejadas puede considerarse como procedente de un cuerpo sonoro ficticio idéntico al cuerpo sonoro real (así como la imagen de un punto luminoso es idéntica á éste); luego, puede *interferir* con el sistema de las ondas directas. Hay en consecuencia producción de franjas silenciosas, que son los nodos, y de franjas sonoras, que son los vientres, y estas franjas son planos perpendiculares al eje del tubo.

Cuanto á las variaciones de densidad y presión que caracterizan los nodos, resultan de las condensaciones y enrarecimientos sucesivos de las ondas, en virtud de las cuales las capas de aire se acercan y se alejan alternativamente de

Fig. 315.

los nodos. En el instante en que las ondas van unas hacia otras (fig. 315, I) hay condensación ; en el momento siguiente las ondas se alejan (fig. 315, II) y hay enrarecimiento ; pero como en ambos casos las velocidades son iguales y de signos contrarios, la capa de separación, ó el nodo, permanece siempre inmóvil.

Fórmulas de los tubos. — El principio de las interferencias no sólo explica la existencia de los nodos y vientres de vibración, sino que permite determinar geométricamente su situación en la longitud del tubo. No hay sino hacer intervenir una condición suplementaria, á saber, que la longitud del tubo debe ser tal que el plano de su embocadura constituya en todos los casos un vientre de vibración. Así se encuentran las fórmulas (323) que abarcan todas las leyes de los tubos.

327. **Pulsaciones.** — Este fenómeno fué descubierto por el físico Sauveur.

Cuando dos sonidos que difieren muy poco en elevación se producen simultáneamente, obsérvanse, á más de la impresión desagradable que resulta de su disonancia, *reforzamientos* y *debilitaciones* periódicas muy claras. Se da el nombre de pulsaciones sobre todo á los primeros, á los aumentos de fuerza ; pero las debilitaciones se deben á la misma causa y forman en cierto modo parte del mismo fenómeno.

Se ha descubierto por experiencia que el número de estas pulsaciones depende al mismo tiempo del intervalo de los dos sonidos y de su elevación absoluta : *es igual á la diferencia de los números de vibraciones* de los sonidos. Por ejemplo, si se produce simultáneamente la nota do_1 (28 vibraciones simples) y una nota algo inferior al do_1 ♯ (que hace 33 vibraciones), se tendrán 5 pulsaciones por segundo. Si se produjeran las mismas notas en la octava aguda, se tendrían 10 pulsaciones.

Las pulsaciones se deben á la interferencia de dos ondas, de periodos poco diferentes pero desiguales, que corresponden á sonidos muy parecidos. Supongamos por ejemplo que uno de ellos efectúe 8 vibraciones simples, mientras que el otro da 9. El estado vibratorio del aire, en el camino común á ambas ondas, podrá ser representado por las dos curvas de la figura 316. Aquí se produce un fenómeno análogo al del método de las coincidencias de Borda : sólo que este es sensible al oído en vez de serlo á la vista como en el caso de los dos péndulos. En el instante en que los movimientos de las dos ondas sonoras son exactamente opuestos, sus efectos se destruyen con corta diferencia y hay una debilitación correspondiente en la intensidad total de los dos sonidos. Á partir de este

Fig. 316.

momento, se ve que las dos ondas se separan poco á poco; una de ellas, la que procede del sonido más alto, se adelanta á la otra, hasta que se encuentra en la misma fase que ella : lo que ocurre cuando el sonido correspondiente ha efectuado 4 1/2 vibraciones mientras que el otro da 4 : en este momento hay *coincidencia* de las dos ondas, sus efectos se suman y la intensidad total de los dos sonidos experimenta un reforzamiento : hay, pues, *pulsación*. Por fin, á partir de este instante las ondas se separan de nuevo cada vez más, hasta encontrarse cada una en una fase exactamente opuesta, lo que ocurre al cabo de 4 1/2 vibraciones completas del sonido más agudo y de 4 vibraciones del sonido menos agudo.

Estos dos estados sucesivos, de *oposición* y de *coincidencia* de las ondas están indicados en la figura 316 por pares de flechas, ya contrarias, ya yuxtapuestas, en los puntos correspondientes.

CAPITULO V

ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LOS SONIDOS. — TIMBRE. PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS.

328. **Análisis de los sonidos. — Método de Helmholtz: Resonancia y resonadores.** — Helmholtz fué el primero que demostró en 1863 que la mayor parte de los sonidos considerados como sencillos son compuestos. Su método se funda en la *resonancia*, quiere decir, en la propiedad que tienen las cajas sonoras, cuando son de dimensiones convenientes, de vibrar espontáneamente al unísono de un sonido dado y de reforzarlo. Las cajas de resonancia utilizadas por Helmholtz son globos huecos, de latón, cuyas dimensiones varían de manera que puedan reforzar todas las notas de la gama: esto es lo que se llama *resonadores*.

Cada resonador está taladrado en los dos extremos de un mismo diámetro por dos agujeros circulares (fig. 317): en uno se fija un conducto ó gollete cilíndrico *a*, y en el otro uno cónico *b*. La elevación del sonido con que está acorde un resonador depende de sus dimensiones y del tamaño de la abertura *a*. El operador recibe el sonido exterior por el orificio *a*, é introduce el coño *b* en uno de sus oídos cuidando de taparse el otro. Experimentando de esta manera, el oído es sordo para todo sonido que no sea el del resonador, mientras percibe este muy bien apenas se produce, aunque sea débil y esté mezclado con otros armónicos. De ahí un método muy sencillo para distinguir un sonido entre gran número de otros.

Fig. 317.

Valiéndose de resonadores diferentemente concertados pudo descomponer Helmholtz los sonidos de los distintos instrumentos de música y de la voz humana, y aun ciertos ruidos.

329. **Resonadores y Aparato analizador de Kœnig.** — El resonador de Helmholtz ha sido perfeccionado por Kœnig, así como el método de análisis de los sonidos. El resonador de Kœnig es cilíndrico y se alarga ó se acorta lo mismo que un anteojo; la extremidad que recibe el sonido puede estirarse más ó menos, haciendo variar según se quiera el volumen del gas vibrante (fig. 318). Como el sonido va haciéndose entonces cada vez más grave, un mismo resonador puede servir para reforzar sucesivamente varias notas. En la extremidad cónica puede aplicarse un tubo de caucho que sirve para unir el resonador con las llamas manométricas.

Fig. 318.

La aplicación sucesiva de resonadores diferentes al oído era un método lento y penoso en el método de Helmholtz. Por esto imaginó Kœnig un aparato en que una serie de resonadores ejercen su acción sobre llamas manométricas: de esta manera los sonidos se hacen *visibles* y pueden ser distinguidos por toda la clase.

Consiste este aparato en una armadura de fundición XY (fig. 319), donde se fijan, formando dos series paralelas, catorce resonadores concertados para dar cuatro octavas y media (de fa_1 á do_5); una cámara C recibe el gas del alumbrado por un tubo de caucho D, y contiene ocho mecheros provistos de cápsulas manométricas. Cada mechero está en comunicación con la cámara C por un tubo de

caucho especial, mientras que detrás del aparato hay otros conductos que ponen en comunicación cada mechero con uno de los resonadores. Á la derecha de los mecheros se distingue un sistema de espejos giratorios AB que sirven para poner de manifiesto los dientes de las llamas vibrantes.

Supongamos, por ejemplo, que el resonador mayor de la izquierda

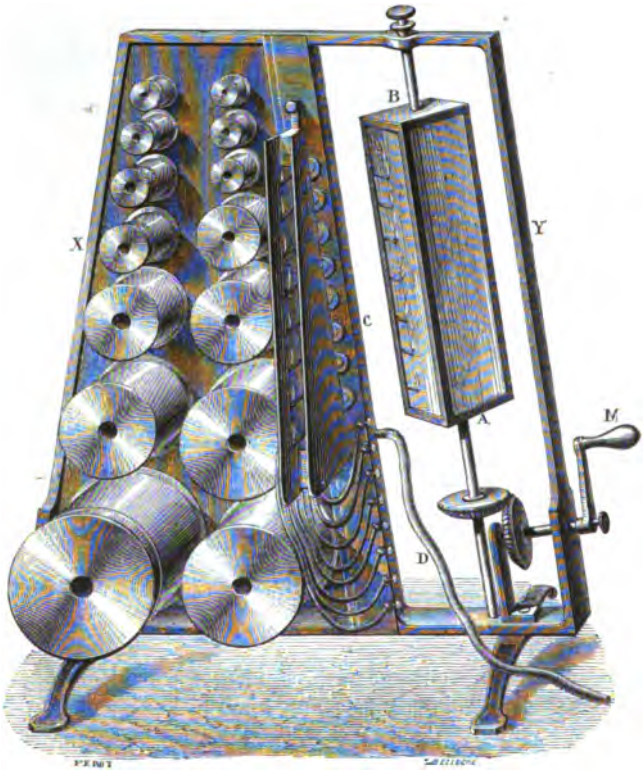


Fig. 319.

esté concertado para reforzar el sonido 1 y los otros siete con los armónicos de este sonido, y que cada uno de los ocho se encuentre en comunicación con un mechero de gas. Produciendo entonces el sonido 1 delante del aparato, si ese sonido es simple, habla solo el resonador inferior y únicamente la llama que le corresponde presenta dientes; pero si el sonido fundamental viene acompañado por uno ó varios de sus armónicos, los resonadores consonantes hablan al mismo tiempo, según prueban los dientes y recortes de sus llamas. De esta manera se analiza el sonido que se emite.

330. **Resultados generales. — Causa del timbre.** — Helmholtz logró demostrar por medio de estos aparatos la existencia de *sonidos simples* y analizó los *compuestos*.

1°. Los sonidos simples son los que resultan de una sola especie de vibraciones, sin mezcla ninguna de sonidos armónicos ni de sonidos accesorios. Un diapasón que se hace vibrar en el orificio de un tubo sonoro, emite un sonido simple. Una flauta, la voz humana que pronuncia la letra *u*, emiten sonidos *casi* simples, porque los armónicos que acompañan al fundamental tienen escasa intensidad. El carácter físico de los sonidos *simples* es que, si bien se distinguen entre sí por la elevación y la intensidad, no *se diferencian* de manera sensible en el *timbre;* únicamente los *compuestos* tienen *timbres claramente distintos.*

2°. Helmholtz ha establecido entre los sonidos compuestos dos categorías. Unos no están formados por la superposición de armónicos verdaderos; su sonido fundamental está acompañado por otros parciales, no armónicos, que son más ó menos persistentes, más ó menos regulares: á esta categoría pertenecen los que se obtienen con placas metálicas y campanas de vidrio ó metal. Los sonidos compuestos de esta clase *están desprovistos de carácter musical.* Al contrario, los constituídos por un sonido fundamental, acompañados de armónicos propiamente dichos, poseen en alto grado el *carácter musical:* tales son los producidos por los diversos instrumentos de música.

3°. Helmholtz ha demostrado en lo tocante á sonidos musicales propiamente dichos que las diferencias de timbre se deben no sólo á la mayor ó menor multiplicidad de los armónicos superiores, sino también á su grado de intensidad más ó menos alto.

4°. *Timbre de las vocales.* — Aplicando su método de análisis á los sonidos que emite la voz humana, observó en éstos la existencia de los armónicos: son, pues, musicales. Los 6 ú 8 primeros armónicos son claramente perceptibles en cada una de las *vocales* emitidas por la boca: pero estos diferentes armónicos adquieren diverso grado de intensidad, según la forma que toma la cavidad bucal cuando los pronuncia; ahora bien, esta forma es determinada por la vocal que se quiere pronunciar. Así pues, la diferencia de entonación de las diversas vocales depende de que cada una tiene timbre especial, y este timbre resulta del predominio de tal ó cual armónico, de elevación definida.

Por ejemplo, la vocal *a* está caracterizada por el predominio de la nota $si_4\flat$. Cuando se la pronuncia con elevación cualquiera, el $si\flat$ es el sonido dominante entre los armónicos emitidos por la cavidad bucal.

El sonido característico de la vocal *o* es el $si\flat$; el de la vocal *u* es el fa_2.

Algunas otras vocales ó diptongos están caracterizadas por dos

armónicos predominantes, uno agudo y grave el otro. Así, para la vocal *e* son el fa_2 y el $si\flat$ simultáneos; para *i* son fa_2 y re_6; para *u*, fa_2 y sol_5; para el diptongo *ai*, son re_4 y sol_5 y para *eu*, fa_3 y do_5 [1].

331. **Síntesis de los sonidos.** — Helmholtz no se limitó á descomponer los sonidos, sino que comprobó los resultados de su análisis por la síntesis, es decir, que reprodujo un sonido dado por la superposición de los simples que había descubierto valiéndose del aparato analizador. Esta síntesis la efectuó por medio de otro aparato, muy ingenioso, pero bastante complicado, y que es imposible describir en un tratado elemental.

PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS.

332. **Descripción del oido.** — La percepción de los sonidos corre á cargo del sentido del *oído* y de su órgano especial, que la

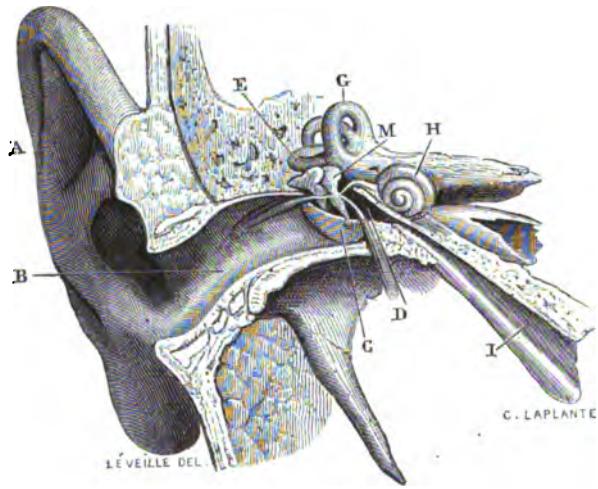


Fig. 320.

figura 320 representa en conjunto, viéndose los pormenores en las 321 y 322.

Pueden distinguirse en este órgano tres partes: *oído externo*, *medio* é *interno*.

Oído externo. — Se compone de tres partes:

1°. La *oreja* ó pabellón A, membrana cartilaginosa;

2°. y 3°. El *conducto auditivo* B, que arranca de la *concha* ó fondo

1. Esto no es exacto sino suponiendo que esas vocales y diptongos sean pronunciados por un alemán del Norte, como en los experimentos de Helmholtz.

ensanchado del pabellón, para terminar en el *oído medio* con la *membrana del tímpano* C.

Oído medio. — Está constituído por la *caja del tímpano* y sus accesorios.

El tímpano C es una membrana fina y delicada tendida oblicuamente sobre el eje del conducto auditivo. Forma uno de los fondos de una especie de tambor sonoro, llamado *caja del tímpano*, siendo el otro fondo una membrana elástica.

Esta caja presenta cuatro aberturas: la primera está en la parte superior; la segunda, en lo bajo del tímpano, sirve de orificio á un canal, llamado *trompa de Eustaquio*, que pone en comunicación el oído medio con el aire exterior, por medio de las *fosas nasales*. Las otras dos están en la membrana que hace cara al tímpano y se llaman *ventana redonda* y *ventana oval*, por causa de sus formas res-

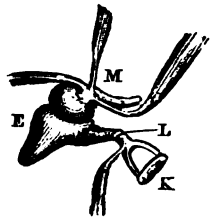


Fig. 321.

Fig. 322.

pectivas. Los dos fondos del tambor están enlazados por una serie de huesos pequeños, la *cadena de los huesecillos* (fig. 321). Uno, el *martillo* M descansa por una parte sobre el tímpano y por la otra en el *yunque* E; después vienen el *hueso lenticular* L y el *estribo* K, cuya base se reune con la membrana de la *ventana oval*. Dos pequeños músculos mueven el martillo y el estribo, haciéndolos apoyarse más ó menos sobre las membranas inmediatas.

Oído interno. — Esta es la parte esencial del órgano y se encuentra protegida por las regiones más duras del hueso temporal, llamadas *apófisis pétrea*. Se compone de tres cavidades: en la parte inferior el *caracol* H (que la figura 322 representa en sección); en el centro el *vestíbulo* y arriba los canales *semi-circulares* G. Su conjunto constituye el *laberinto*, que está tapizado interiormente por una membrana que un líquido gelatinoso baña. En este líquido van á sumergirse las innumerables puntas del nervio acústico. Se las llama fibras de *Corti*, anatómico que las calcula en unas tres mil.

333. **Mecanismo de la audición.** — El pabellón recoge las ondas sonoras que llegan del exterior, las reune, las refleja y las dirige hacia el conducto auditivo.

El conducto auditivo externo transmite las ondas, reforzándolas, á la membrana del tímpano. Ésta se pone á vibrar y sus vibracio-

nes son transmitidas por la cadena de los huesecillos hasta el oído interno. No sólo transmiten los huesecillos mejor de lo que haría un cuerpo gaseoso las vibraciones, sino que además regulan en cierto modo la sensibilidad de las membranas de la caja sonora tendiéndolas más ó menos, según la intensidad ó la agudeza de los sonidos exteriores. Finalmente, la percepción definitiva del sonido se efectúa por medio de los tres mil filetes del nervio acústico. Helmholtz admite que cada fibra, concertada como un pequeño resonador para una nota particular, sólo vibra al unísono de esta nota, y es sorda para todas las demás. Cada sonido simple no hace vibrar sino una sola fibra, al paso que los compuestos ponen en movimiento varias. Esta percepción propia de los sonidos simples por cada fibra de Corti es lo que permite al oído distinguir un sonido entre otros varios y percibir en su conjunto los sonidos más complejos y ricos en armónicos.

Observación. — Los diversos órganos que constituyen el oído son útiles en grados diversos para hacer más completa la sensación y más fino el sentido ; pero sólo uno de ellos es indispensable : el *oído interno* y principalmente el *vestíbulo*. Así es que la pérdida ó ruptura del *tímpano* y la supresión de los *huesecillos* no causan sordera absoluta.

En los crustáceos y los cefalópodos,[1] el sentido del oído no tiene más órgano que el *vestíbulo*. Las demás partes del oído interno no van apareciendo sucesivamente más que en los seres cada vez más elevados en la escala animal, y sólo se encuentran reunidos todos en el hombre.

1. En los demás moluscos no hay sentido auditivo. Tampoco se conoce éste en los *insectos*, pero la función existe.

LIBRO IV

OPTICA

—

CAPITULO PRIMERO

PROPAGACIÓN DE LA LUZ.

334. **Definiciones generales.** — *Luz.* — Llámase *luz* á la causa de los fenómenos que excitan en nosotros, por mediación del sentido de la vista, las sensaciones *de la visión*. Estos fenómenos se llaman á su vez *fenómenos luminosos*.

Cuerpos luminosos, cuerpos iluminados. — Se llama cuerpos *luminosos* á los que emiten luz por sí mismos, como el sol, las estrellas y los cuerpos en ignición. Los no luminosos pueden llegar también á ser visibles para nosotros, en el caso de estar *iluminados*, quiere decir, de que reciban luz procedente de un origen cualquiera para despedirla luego en todas direcciones. La luna, los planetas y casi todos los objetos terrestres se encuentran en este último caso.

Cuerpos transparentes, cuerpos translúcidos. — Los cuerpos *transparentes* ó *diáfanos* son los que dejan pasar fácilmente la luz : á través de ellos se distinguen con claridad los objetos : tales son el agua, los gases, el vidrio pulimentado. Los cuerpos *translúcidos* son también aquellos á través de cuya masa se distingue la luz, pero sin que sea posible reconocer la forma de los objetos : tales son el vidrio sin pulimentar y el papel untado de grasa.

Cuerpos opacos. — Por fin, se denominan *cuerpos opacos* los que no se dejan atravesar por la luz, como la madera ó los metales. Sin embargo, ninguno lo es en absoluto. La opacidad de las sustancias depende de su grueso : todas son más ó menos translúcidas cuando se les reduce á placas bastante delgadas.

Medio transparente, medio homogéneo. — En general se llama *medio* el espacio, lleno ó vacío, en que se produce un fenómeno. El aire, el agua, el vidrio son medios donde la luz puede propagarse y que, por este motivo, reciben el calificativo de *transparentes*. Dícese que un medio es *homogéneo*, cuando su composición química y densidad son idénticas en todos sus puntos.

335. **Óptica geométrica. — Óptica física.** — Dase el nombre de *óptica* á la parte de la física que estudia los fenómenos luminosos.

De ordinario se hacen en óptica dos grandes divisiones : la *Óptica geométrica* ú *Óptica elemental* y la *Óptica física* ú *Óptica superior*, que se diferencian, no sólo en su objeto, sino también por el método que siguen.

La *Óptica geométrica* no comprende sino los fenómenos luminosos más sencillos, más comunes y más fáciles de observar y de reproducir, tales como la reflexión de la luz en los espejos. Estúdiaseles sin emitir ninguna hipótesis acerca de su causa, se determinan sus leyes por la experiencia y se deducen las consecuencias de estas leyes por el razonamiento geométrico. En la *Óptica física* se procede de manera completamente distinta. Primero se plantea una hipótesis sobre la naturaleza de la luz, — es la hipótesis de las ondulaciones ; — se la desarrolla por el análisis matemático y se deducen *a priori*, no sólo los hechos de antiguo conocidos y las leyes experimentales de la óptica geométrica, sino otros completamente nuevos y absolutamente imprevistos, tales como este : *la luz añadida á la luz produce oscuridad.* La experimentación no interviene sino después del cálculo, para probar todas sus consecuencias, mediante experimentos muy delicados, que se efectúan con aparatos de gran precisión

DIRECCIÓN DE LA PROPAGACIÓN.

336. **Ley de la propagación rectilínea.** — *En todo medio homogéneo, la luz se propaga en línea recta.*

Esta ley queda demostrada por los dos hechos siguientes :

1°. Si se interpone un cuerpo opaco en la línea recta que une la vista con un punto luminoso, queda interceptada la luz.

(Llámase *punto luminoso* á un foco luminoso reducido á dimensiones geométricas tan pequeñas como se puede).

2°. La luz que penetra en un cuarto oscuro por un pequeño agujero, marca en el aire un rasgo luminoso rectilíneo. Este rasgo es visible, porque ilumina los polvillos ligeros que se encuentran suspendidos en la atmósfera (fig. 323).

Corolarios. — 1°. *Definiciones.* — Toda dirección rectilínea que sigue la luz al propagarse es un *rayo luminoso;* un conjunto de rayos es el *haz*, y un haz muy abierto el *pincel.*

Cuando los rayos luminosos llegan divergentes de un foco luminoso próximo ó van convergiendo hacia un punto poco distante, el haz ó el pincel se llama *divergente* ó *convergente.* En el caso de que el foco luminoso esté á distancia muy grande, según ocurre por ejemplo con los astros, el ángulo de divergencia de los rayos extremos del haz ó del pincel es insensible : los rayos son físicamente paralelos entre sí y se dice que el haz ó el pincel es *paralelo.* Lo mismo ocurre si el punto de convergencia de los rayos está muy lejos : el haz *convergente* se convierte en un *haz paralelo.*

2°. *Consecuencias.* — De esta ley se deducen dos consecuencias geométricas importantes :

1°. La teoría de las *sombras que dan los cuerpos opacos;*
2°. La teoría de las *imágenes suministradas por las aberturas pequeñas.*

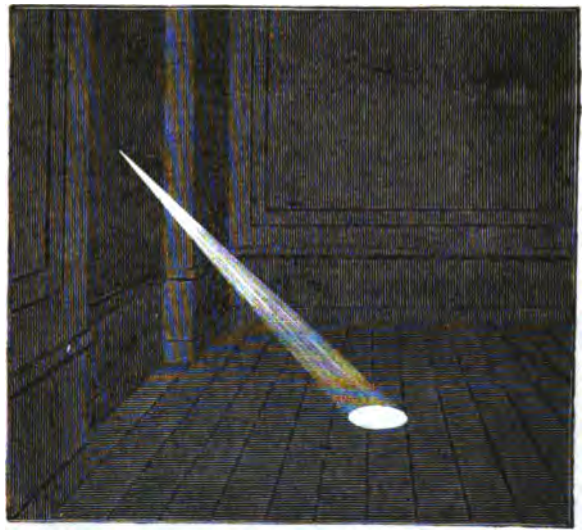


Fig. 323.

337. **Teoría geométrica de las sombras.** — 1°. *Definiciones.* — Llámase *sombra de un cuerpo* opaco, ó mejor dicho *sombra que da* un cuerpo opaco al lugar del espacio en que este cuerpo impide que penetre la luz. El problema geométrico de las sombras consiste en determinar geométricamente la extensión y forma de la sombra dada por un cuerpo opaco cualquiera colocado delante de un manantial de luz. Hay que considerar dos casos, el de un foco reducido á un punto luminoso y el de un objeto luminoso.

2°. *Caso de un punto luminoso.* — Sean S (fig. 324) el punto lumi-

Fig. 324.

noso y M el cuerpo que *da sombra* y que supondremos esférico.

Si se supone que alrededor de la esfera M *se mueva una recta indefinida* SG, *permaneciendo siempre tangente á ella y pasando constantemente*

por el punto S, *esta recta engendra una superficie cónica de revolución, tangente á la esfera y que separa en el espacio la porción que está en la sombra de la iluminada.*

Efectivamente, todo punto como O interior á este cono no puede ser iluminado, puesto que la línea recta SO encuentra al cuerpo opaco.

Si se coloca al otro lado del cuerpo opaco una pantalla PQ, el paso de la sombra á la luz se efectúa bruscamente, sin *degradación* ninguna.

Observación. — La circunferencia *de contacto* del cono tangente con el cuerpo opaco divide además á la superficie de éste en dos hemisferios, uno oscuro é iluminado el otro.

3°. *Caso de un objeto luminoso. Penumbra.* — Supongamos que el

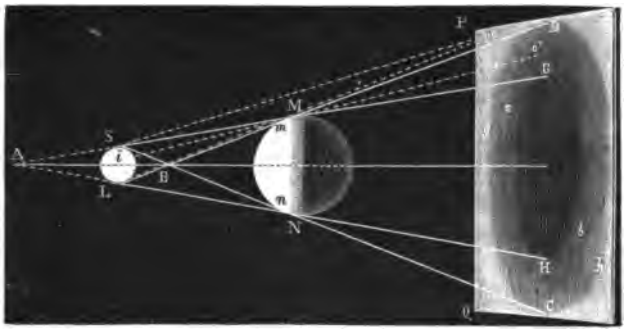


Fig. 325.

cuerpo opaco y el foco luminoso sean dos esferas SL y MN (fig. 325).

Si se imagina que una recta indefinida AG *se mueva tangencialmente á estas esferas, cortando constantemente la línea de los centros en el punto* A, *esa línea engendra una superficie cónica que tiene como vértice este punto, y que limita, detrás de la esfera* MN *un espacio* MGHN *completamente privado de luz.*

Análogamente, si otra recta LD, *que corta á la línea de los centros en* B *gira tangencialmente á las dos esferas de modo que engendre una nueva superficie cónica* DBC, *que tiene su vértice en* B, *toda la parte exterior á esta superficie queda completamente en la luz.*

Efectivamente, si se coloca una pantalla PQ detrás del cuerpo opaco, se distinguen claramente tres regiones: 1°. una zona central HG completamente oscura, limitada por la superficie cónica de las tangentes comunes *exteriores* AMG y ANH; 2°. una zona periférica, completamente iluminada, que está limitada en su parte interior por la superficie cónica de las tangentes comunes *interiores*

LBMD y SBNC; 3°. en fin por una zona intermedia, que está limitada interiormente por el cono de las tangentes exteriores MG y NH, y exteriormente por el cono de las tangentes interiores MD y NC. Esta zona no es ni completamente clara ni del todo oscura, pero la sombra va *degradándose* en ella, quiere decir, atenuándose, desde la zona central á la periférica : he ahí lo que se llama *penumbra;* su iluminación aumenta de G á D.

Se comprende, en efecto, que un punto cualquiera *a* de la zona central G*a*H*b* no puede recibir luz de ninguno de los puntos del cuerpo luminoso,puesto que toda recta que va del punto *a* al foco de luz encontraría necesariamente al cuerpo opaco. Por el contrario, todo punto *o* de la pantalla situado fuera de la superficie DBC puede ser unido por medio de una recta á todos los de SL sin interposición del cuerpo opaco, y recibe en consecuencia la luz de todos estos puntos. Finalmente, todo punto *o'* comprendido entre las dos superficies cónicas no puede recibir luz más que de los puntos de SL situados por encima de *o'i;* luego el punto *o'* está menos iluminado que *o*, y tanto menos cuanto más cerca de la zona central se encuentre.

Observaciones. — 1°. Si se trazan en la esfera opaca dos círculos MN y *mn*, que pasen por los puntos de contacto de las tangentes AG y BD, se tiene una zona *mn*MN á que también corresponde una penumbra.

2°. *Reflejo.* — Cuando un cuerpo opaco intercepta la luz por una de sus caras, la opuesta no es nunca del todo oscura, pues siempre la ilumina más ó menos la luz que reflejan los cuerpos inmediatos. El efecto de esta reverberación es lo que se llama *reflejo.* Ahora bien, como la luz reflejada por un cuerpo coloreado participa del color propio de este cuerpo, los reflejos toman á su vez el tono de los objetos inmediatos.

338. **Aplicaciones.** — La teoría geométrica de las sombras se aplica á gran número de casos usuales. La penumbra es fácil de distinguir alrededor de la sombra que dan los árboles, las casas, los monumentos expuestos al sol. Cada vez que la luz de un foco artificial de cierta extensión, como una llama de bujía, ó de lámpara, ó de mechero de gas, es interceptada por un cuerpo opaco, se observa que la sombra recibida por las paredes no es nunca precisa en sus contornos, sino al contrario más ó menos vaga á causa de la penumbra. Por el contrario, la penumbra se hace insensible y la sombra toma aspecto cada vez más caracterizado cuando el foco de luz se reduce á un punto : tal ocurre con el alumbrado por arco voltaico.

Eclipses. — La explicación del gran fenómeno astronómico de los eclipses es una consecuencia directa de la teoría de las sombras.

339. **Imágenes suministradas por las pequeñas aberturas.** — Cuando la luz exterior penetra en una *cámara oscura por un pequeño*

agujero hecho en una ventana, los rayos pintan los objetos exteriores en una pantalla que los reciba. *Estas imágenes, más ó menos precisas, pero del mismo color que los objetos*, presentan los caracteres siguientes : 1°. *son invertidas;* 2°. *su forma es independiente de la abertura.*

Este curioso fenómeno se explica bien por la propagación rectilínea de la luz. Sea una abertura triangular O (fig. 326), practicada en la pared de una cámara oscura, y sea *ab* una pantalla donde se recibe la imagen de una llama AB colocada fuera. De cada punto de la llama sale un haz luminoso divergente, que penetra en la cámara y va á formar en la pantalla una imagen triangular análoga á la aber-

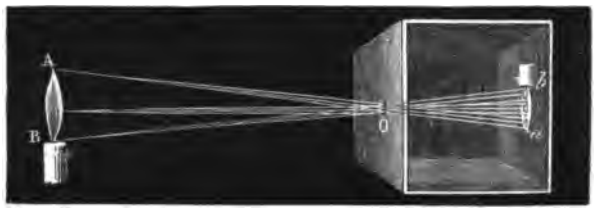


Fig. 326.

tura, según indica el dibujo. El conjunto de todas estas imágenes parciales produce una imagen total de la misma forma que la llama iluminante y en que desaparecen por completo las líneas del agujero. Efectivamente, si la luz está muy lejos y la abertura es muy pequeña, el pincel enviado por cada punto luminoso se reduce sensiblemente á su eje. Ahora bien, si se supone que una recta indefinida se mueve en la abertura de la pared, que suponemos muy pequeña, y con la condición de que esa recta permanezca siempre tangente al objeto luminoso AB, describe en su movimiento dos superficies cónicas que tienen por vértice común la abertura misma de la cámara oscura, y por bases uno de los cuerpos luminosos, y la otra la parte iluminada de la pantalla, es decir, la imagen. Si la pantalla es perpendicular á la recta que une el centro de la abertura con el del cuerpo luminoso, la imagen es semejante á este cuerpo; si la pantalla es oblicua, la imagen se alarga en el sentido de la oblicuidad.

Observación. — Estos dos casos se observan en las sombras que dan las hojas de los árboles : los haces luminosos que pasan al través, producen imágenes del sol, que son redondas ó elípticas, según es perpendicular ú oblicua á los rayos la superficie donde se proyectan, y con entera independencia de la forma de los intersticios por donde pasa la luz entre las hojas.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN.

340. **Velocidad de la luz. — Historia y resultado.** — La luz se propaga con velocidad tan grande que, en la superficie de la tierra y en circunstancias ordinarias, no es posible observar ningún intervalo apreciable entre el momento de producirse el fenómeno luminoso y aquel en que la vista lo percibe á una distancia cualquiera : así es que hasta el siglo XVI se admitió como evidente que la propagación de la luz es *instantánea*, ó en otros términos que su velocidad es *infinita*. Bacón fué el primero en emitir la idea de que la luz debe tardar un tiempo apreciable para propagarse de un punto á otro y Galileo trató, *antes que nadie*, de calcular ese tiempo.

Método de Rœmer. — Pero quien obtuvo los primeros números plausibles y aceptables para la velocidad de la luz fué Rœmer, deduciéndolos de la observación atenta y de la juiciosa interpretación de un fenómeno astronómico.

Principio del método. — Sábese que el primer satélite de Júpiter (el más cercano de los cuatro) [1] efectúa sus inmersiones en la sombra proyectada por el planeta á intervalos de tiempo iguales, que son de $42^h\ 28^m\ 36^s$.

Pues bien, supongamos que se observe el instante de una primera inmersión cuando Júpiter está en j y la Tierra en T (fig. 327) ; y después otra al hallarse

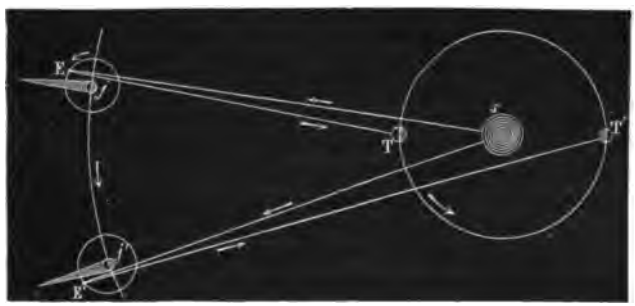


Fig. 327.

los dos astros en j' y en T', es decir, cuando la distancia de la Tierra á Júpiter ha aumentado en todo el diámetro de la órbita terrestre. En vez de hallar que el tiempo transcurrido entre estas dos observaciones sea un múltiplo de $42^h\ 28^m\ 36^s$, igual al número n de eclipses que se ha producido durante el paso de la Tierra de T á T', se encuentra un tiempo θ, que es igual á n veces $42^h\ 28^m\ 36^s$ más un exceso θ'. Evidentemente este intervalo θ', lo ha necesitado la luz para recorrer el aumento de distancia TT'. De ahí se deduce que para recorrer la distancia D de la Tierra al Sol, quiere decir $\frac{1}{2}$ TT', la luz tarda un tiempo $t = \frac{1}{2}\theta'$ y que la velocidad de la luz está dada por la ecuación $V = \frac{D}{t}$.

Resultados. — La precisión de los resultados de esta medida depende, pues, de la

1. Hoy se cree que hay cinco.

exactitud con que se determinan los números D y *t*. Ahora bien, por una parte la distancia del sol á la Tierra, que es una función de la *paralaje solar*, no se conocía sino imperfectamente en tiempo de Rœmer. Por otra parte, el cálculo de *t* (que creyó igual á 11 minutos) presentaba un grave error, por ser deducido de número insuficiente de observaciones. Estos dos motivos hicieron que el número obtenido por Rœmer (48,000 leguas de 25 al grado) careciese de exactitud suficiente, por lo cual no ha sido conservado.

Cálculos de Delambre. — Delambre repitió los cálculos de Rœmer, valiéndose de 5000 observaciones, que abarcaban un período de 140 años. Halló para *t* el valor (mucho más exacto) de $8^m,13^s$, ó mejor de $493^s,243$. Cuanto á la distancia D, las observaciones relativas á los pasos de Venus en 1761 y 1769 permitieron apreciarla con aproximación muy superior á la de las evaluaciones anteriores. Delambre obtuvo, con los valores admitidos para estos dos coeficientes, que V = 310,000 kilómetros.

Adoptando para la paralaje el número actual de $8^s,86$, que parece más exacto, el valor de la velocidad se reduce á 299,000 kilómetros por segundo.

Métodos físicos. — Los resultados de estos métodos astronómicos han sido confirmados por medidas directas, efectuadas siguiendo métodos puramente físicos, en 1839 por Fizeau, por León Foucault de 1850 á 1862 y por Cornu en 1873 y 1875.

Fizeau obtuvo 315,000 kilómetros por segundo, cifra muy semejante á la que resulta del método de Rœmer. Cornu, que aplicó el mismo procedimiento perfeccionándolo en sus detalles, halló 298,400 kilómetros en una primera serie de experiencias y en una segunda 300,400 (con aproximación que calcula en 1/100 por exceso ó por defecto). Este número difiere poco de uno de los del método de Bradley. Por fin, Foucault obtuvo 298,000 kilómetros. No se debe estar lejos de la verdad adoptando 300,000 kilómetros por segundo como velocidad de la luz en el aire.

Agreguemos que los trabajos de Foucault lo condujeron además al resultado, importantísimo teóricamente, de que la velocidad de propagación de la luz es *más pequeña en el agua que en el aire.*

341. **Experiencias de Fizeau.** — Fizeau midió directamente la velocidad de la luz buscando el tiempo que necesita un rayo luminoso para ir de Suresnes á Montmartre y para regresar.

Su aparato consistía en una rueda dentada, que giraba con más ó menos velocidad, y cuyos dientes distaban unos de otros intervalos rigorosamente iguales á su grueso. Esta rueda y el mecanismo que la movía se encontraban instalados en Suresnes : un haz de luz paralelo pasaba por entre sus dientes é iba á reflejarse en un espejo situado en Montmartre, de donde se le hacía volver á la rueda por medio de un sistema de tubos y lentes. Si la rueda se hallaba en reposo, el haz volvía á pasar exactamente por entre los mismos dientes que al partir : pero si aquella giraba con rapidez suficiente para que un diente ocupara el lugar de un intervalo, el haz luminoso era interceptado, y el observador no veía nada en el anteojo que dirigía sobre la rueda. Dada mayor velocidad de rotación, el intervalo vacío entre los dos dientes siguientes había ocupado el lugar del primero en el instante del regreso del haz, y la imagen aparecía de nuevo.

De manera que las cosas ocurrían como si se hubiera bajado y subido alternativamente una pantalla entre el punto luminoso y el observador. El número 1 de la fig. 328 representa un punto luminoso visto á través de los dientes de la rueda

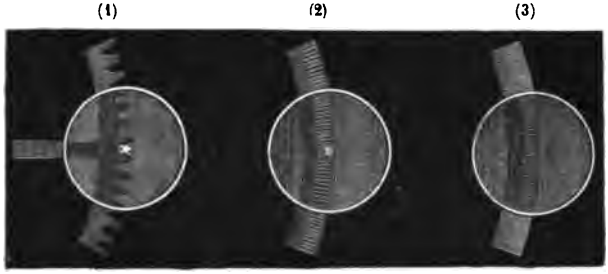


Fig. 328.

inmóvil; el nº. 2 indica la desaparición parcial del punto luminoso, que se ha borrado enteramente en el número 3. Ya hemos dicho cuales fueron los resultados numéricos de estas medidas.

INTENSIDAD DE LA LUZ. — FOTOMETRÍA.

342. **Definiciones. — Intensidad de un manantial de luz.** — La iluminación producida en una superficie determinada por un foco luminoso depende al mismo tiempo de su naturaleza, de su distancia y de la inclinación de sus rayos. Así pues, si se quiere calcular el poder iluminante de un foco, hay que colocarlo en condiciones perfectamente determinadas de distancia y de orientación respecto de la superficie iluminada. Se ha convenido en llamar *intensidad de un manantial de luz* á la cantidad de ella que ese manantial envía *normalmente* sobre la *unidad de superficie* de un cuerpo iluminado, puesto á la *unidad de distancia.*

Llámase *fotometría* á la parte de la óptica que comprende las leyes relativas á la intensidad de la luz y los métodos que sirven para *medirla.*

Tipos de luz. — Medir la intensidad de una luz es compararla con otra cantidad de la misma especie, tomada por unidad. Empléanse varias unidades ó *tipos* de luz.

La Conferencia internacional de 1884 adoptó como *unidad práctica* de luz blanca el tipo propuesto por M. Violle, á saber, la cantidad total de luz emitida por 1 centímetro cuadrado de platino, á la temperatura de solidificación.

Como esta unidad es demasiado grande en la práctica, el Congreso de electricistas de 1889 adoptó la *bujía decimal*, igual á 1/20 del *tipo Violle.*

La unidad usada hasta ahora con más frecuencia en Francia era el *mechero Carcel*, que es la intensidad luminosa de una lámpara Car-

cel que quema 42 gramos de *aceite de colza refinado* en una hora [1]. El tipo Violle vale 2,08 *mecheros Carcel.*

En Inglaterra, la unidad práctica es el *Candle* (la vela) ó el *Parliamentary Standard*, ó sea la intensidad de una bujía de spermaceti de 7/8 de pulgada de diámetro, y que quema por hora 120 gramos [2]. El tipo Violle vale 15,392 Candles.

En Alemania la unidad es el *Kerzen*, ó intensidad de una bujía de parafina de 20 mm de diámetro, que arde con una llama de 5 cm de altura. El tipo Violle vale 15,808 Kerzen.

Iluminación. — La unidad práctica de iluminación es la *bujía á 1 metro*, ó la *Carcel á 1 metro;* quiere decir la iluminación que da una bujía ó una lámpara Carcel colocadas á 1 metro de distancia. Se necesita una iluminación de 20 á 30 bujías á 1 m, en un punto cualquiera de un local, para que esté suficientemente alumbrado. Para poder trabajar fácilmente en una mesa de lectura precisan por lo menos 30 bujías á 1 metro.

343. **Método fotométrico. — Fotómetros.** — El método fotométrico usual se funda en los principios siguientes:

1°. *La cantidad de luz recibida normalmente en una superficie dada varía en razón inversa del cuadrado de su distancia al foco luminoso.*

2°. (Ley del coseno). *La cantidad de luz recibida oblicuamente es proporcional al coseno del ángulo que forman los rayos luminosos con la normal á la superficie alumbrada.*

3°. *Las intensidades de dos focos luminosos que producen en las mismas condiciones la misma iluminación, son directamente proporcionales á los cuadrados de sus distancias respectivas á la superficie iluminada.*

Las dos primeras leyes se demuestran *a priori* y por los mismos razonamientos que las correspondientes del calor radiante [3].

Cuanto á la tercera ley, es consecuencia directa de la primera. En efecto, sean I é I' las intensidades de dos focos L y L' que producen la *misma iluminación* en una superficie orientada del mismo modo respecto de cada una de ellas, pero situada á distancias diferentes, d y d'. Según las definiciones precedentes, la cantidad de luz enviada por L sobre la unidad de superficie de la pantalla es igual á $\frac{I}{d^2}$; para L' esta cantidad es $\frac{I'}{d'^2}$. Tiénese, pues

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}, \quad \text{de donde} \quad \frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Esta ley constituye hablando en propiedad el *método fotométrico.* Se la *demuestra* y se la aplica al mismo tiempo en los *fotómetros.* Estos aparatos no tienen más objeto que producir la igualdad de

1. Con una llama de 40 mm. y en las condiciones sentadas por J. B. Dumas y Regnault para el examen del poder iluminante del gas en París.
2. Las variaciones de este tipo pueden llegar á 30 0/0.
3. Haremos esta demostración al hablar del calor.

iluminación en una superficie dada, por medio de dos focos de luz que se comparan, y permitir probar, con más ó menos facilidad y precisión, esta igualdad de alumbrado.

344. **Fotómetro de Rumford.** — Compónese de una pantalla de vidrio sin pulimentar delante de la cual se coloca una varilla opaca *m* (fig. 329). Á cierta distancia están colocadas las luces que se desea comparar, por ejemplo, una lámpara y una bujía, de manera que cada una de ellas proyecte una sombra de la varilla en la pantalla. Las dos sombras son al principio de la misma intensidad: pero ale-

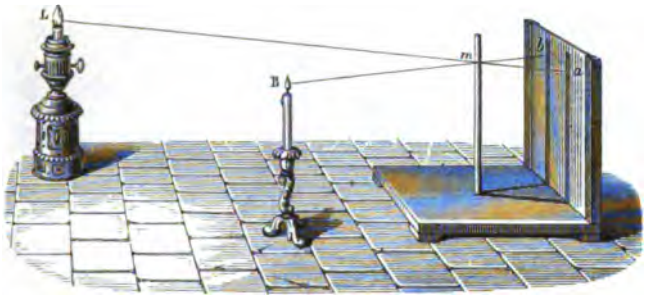


Fig. 329.

jando ó acercando poco á poco la lámpara, se encuentra una posición en que la intensidad de las dos sombras *a* y *b* es idéntica. Estas sombras constituyen entonces dos superficies *igualmente iluminadas* por los dos focos; la igualdad de iluminación es más fácil de apreciar en esas dos superficies poco alumbradas que en lo demás de la pantalla. Entonces *las intensidades de las dos luces* B *y* L *son directamente proporcionales á los cuadrados de las distancias de cada una de ellas á la sombra dada por la otra.* Tiénese pues, llamando *d* y *d'* las distancias respectivas de B á *a* y de L á *b*,

$$\frac{B}{L} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Observación. — En la práctica es muy difícil hallar el momento preciso en que las sombras alcanzan el mismo grado de oscuridad, sobre todo cuando los dos focos luminosos no tienen la misma coloración, que es el caso general.

345. **Fotómetro de Bunsen.** — El fotómetro más usado en la práctica es el de *mancha*, que se debe á Bunsen. La igualdad de iluminación se produce en una *mancha de aceite* situada en el centro de una pantalla de papel blanco. Vista la mancha por reflexión, es más oscura que el papel, y lo contrario por transparencia. Colócase esta pantalla entre las dos luces que se van á comparar, en la recta que las une, y se la va moviendo hasta que la mancha desaparezca,

quedando la hoja blanca uniformemente iluminada; en este momento son iguales las iluminaciones; sólo falta medir las distancias respectivas de cada foco luminoso á la pantalla.

Disponiendo dos espejos planos, igualmente inclinados á cada lado del marco (fig. 330), se verán una junto á otra las imágenes

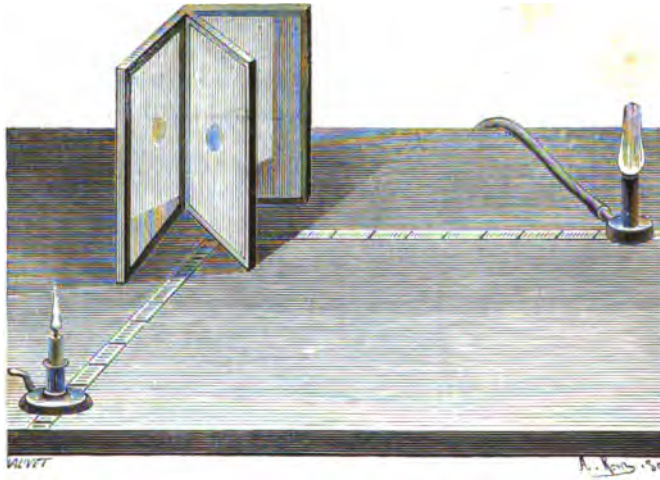


Fig. 330.

de las caras de la mancha, y será más fácil observar el momento de su desaparición.

346. **Procedimiento fotométrico de M. Crova.** — El fotómetro de Bunsen, lo mismo que el de Rumford, no permite comparar entre sí más que focos luminosos del mismo color. Cuando los tonos son diferentes, — que es el caso ordinario, — hay que referir la medida al caso de luces de análogo color, siguiendo el método de M. Crova, que consiste en interponer entre la vista y la pantalla un medio coloreado que no deje pasar sino radiaciones comprendidas dentro de ciertos límites. Este método no se ha generalizado todavía. Así se explican las divergencias considerables de los números indicados por los experimentadores relativamente á los mismos focos de luz, en particular tratándose de arcos voltaicos.

347. **Brillo intrínseco de los focos de luz.** — Llámase *brillo intrínseco* de un foco de luz al cociente de su *intensidad fotométrica* por su superficie. Depende más especialmente de la temperatura del foco.

He aquí algunos números que tomamos del *Formulario del Electricista* de 1893. Su determinación se debe á M. Monnier.

Mechero bujía.	0,06	por cm.
Mechero de Argand	0,3	—
Quemador intensivo de Siemens	0,6	—
Lámpara eléctrica de incandescencia. . .	30	—
Arco voltaico.	480	—
Sol.	50 480	—

CAPÍTULO II

CATÓPTRICA [1].

REFLEXIÓN ESPECULAR Y ESPEJOS PLANOS.

348. **Reflexión especular. — Definiciones y Leyes.** — Cuando un rayo luminoso encuentra en su camino una superficie pulimentada, se refleja en ella con arreglo á ciertas leyes. Este es el fenómeno de la *reflexión regular* ó *reflexión especular* [2].

Llámase *rayo incidente* [3] á la dirección rectilínea qne sigue la luz al caer sobre el espejo; *rayo reflejado*, á la dirección en que el espejo despide después la luz; *ángulo de incidencia* al que forma el rayo incidente con la normal á la superficie en el punto de incidencia; *ángulo de reflexión*, al del rayo reflejado con la misma normal.

Las leyes de la reflexión especular son las siguientes:

1°. *El rayo incidente y el reflejado se encuentran en un mismo plano, normal á la superficie reflectora.*

2°. *El ángulo de reflexión es igual al de incidencia.*

Demostración experimental. — El mejor método es el siguiente. Colócase verticalmente un círculo graduado M. (fig. 331), en cuyo centro está fijo un anteojo, móvil en un plano paralelo al nimbo. Dispónese además, á conveniente distancia, un baño de mercurio, cuya superficie libre constituye una superficie reflectora perfectamente plana y horizontal [4]. Hecho esto, se mira con el anteojo, siguiendo una dirección OE, una estrella de primera ó de segunda magnitud; y después se inclina el anteojo de manera que se distinga la misma estrella según O'I en el baño de mercurio. Esto

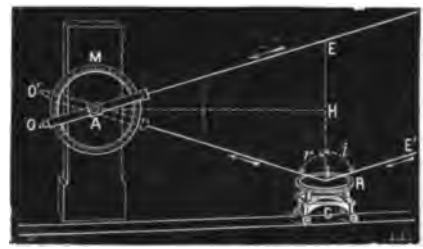


Fig. 331.

1. De κάτοπτρον, espejo : capítulo de la óptica en que se estudia la reflexión de la luz y sus aplicaciones.

2. De *speculum*, espejo.

3. Del latín *incidere*, caer.

4. *Baño pelicular de M. Perigaud.* — Una manera de obtener un baño de mercurio de superficie plana inmutable para este experimento es emplear el *baño pelicular* de M. Périgaud (fig. 332).

Compónese de un platillo de hierro colado RR, *separado de su borde por una media*

ocurre cuando se reciben en el anteojo los rayos reflejados IA, que corresponden á los incidentes E'I que proceden de la estrella. Pues bien, se observa que las dos direcciones sucesivas del anteojo, y por consiguiente los dos rayos EA é IA, forman ángulos iguales con la horizontal AH : de donde es fácil deducir que el ángulo de incidencia E'IE es igual al de reflexión EIA. En efecto, siendo IE la normal á la superficie del mercurio, esta recta es perpendicular á AH, el triángulo AIE es isósceles y los ángulos AIE y AEI son iguales ; pero como los dos rayos luminosos AE é IE' son paralelos por causa de su gran distancia á la estrella, los ángulos AEI y EIE' son iguales por alternos-internos : luego EIE' = EIA.

349. **Reflexión irregular** ó **Difusión.** — La cantidad de luz reflejada regularmente, según las leyes anteriores, dista mucho de representar la totalidad de la luz incidente. Ésta se divide en dos partes cuando cae sobre una superficie más ó menos bien pulimentada : una porción se refleja de la manera dicha, mientras otra es despedida en todas direcciones : de ésta se dice que *se ha reflejado irregularmente* ó que se *ha difundido.*

La luz reflejada irregularmente recibe el nombre de *luz difusa ;* gracias á ella podemos ver los cuerpos iluminados.

350. **Poderes reflectores y difusivos.** — La luz se refleja *regularmente* según las mismas leyes que el *calor radiante* y en análoga proporción. Los *poderes reflectores* para la luz (es decir, la relación entre la intensidad del haz reflejado y la del haz incidente) son pues los mismos que para el calor, y varían del mismo

caña de 4 á 5 mm. de grueso, que comunica por un tubo con un cilindro P, donde hay mercurio que puede ser enviado al platillo por medio de un émbolo de inmersión. El aparato entero está sostenido por tres tornillos de nivel, *que permiten poner el platillo sensiblemente horizontal.*

Fig. 332.

Para servirse del baño, se empieza por limpiar bien el platillo y por ponerlo horizontal, y después se dan vueltas al tornillo del émbolo, para hacer salir el mercurio. Éste empieza por llenar la media caña y después se extiende sobre el platillo Supongamos que para cubrir enteramente el platillo sea necesario dar 4 vueltas al tornillo ; entonces se puede — cosa curiosa — hacer volver el mercurio al depósito dando al tornillo 3 vueltas y 1/4, *sin que el espejo se deforme, y sin que se altere la horizontalidad.* En el platillo no queda más que una capa de metal muy fina. Su grueso, que era al principio de 3 mm, se reduce á $\frac{3}{4}$ mm próximamente. En este momento, las imágenes de los objetos aparecen mucho más brillantes y perceptibles, no obstante las trepidaciones del suelo.

Si se pasa el límite indicado de $\frac{3}{4}$ mm, el espejo se rompe, como haría un muelle ó una membrana demasiado tensa.

modo con el *ángulo de incidencia*; así para el vidrio y las sustancias transparentes el poder reflector varía desde 0,05 para la incidencia de 20°, y 0,546 para la incidencia de 80°. La concordancia es la misma entre los dos poderes reflectores (caloríficos y luminosos) de las sustancias metálicas pulimentadas.

Cuanto á la proporción de *luz difusa*, no sólo varía con el *grado de pulimento* de la superficie difundente, sido también con la naturaleza del cuerpo, con su color, y con el *ángulo de los rayos incidentes*. Las que más difunden son las *mates* y principalmente las de *un blanco-mate*. El brillo de una hoja de papel *blanco* es tanto mayor cuanto más perpendicularmente se ilumina la superficie. Si nos colocamos para mirarla en posiciones cada vez más oblicuas, se observa que el brillo va debilitándose, lo que prueba una disminución correspondiente en la proporción de los rayos difundidos. En cambio, la proporción de rayos reflejados aumenta en razón análoga, y si se coloca una llama de bujía muy cerca de la hoja (fig. 333) y se la mira bajo una incidencia rasante, se distingue una imagen invertida de la llama, como si el papel fuera una superficie pulimentada.

Fig. 333.

351. **Espejos.** — Se da el nombre de *espejo* á toda superficie pulimentada que refleja regularmente la luz, reproduciendo la imagen de los objetos iluminados que se le presentan. Según su forma, son *planos*, *cóncavos*, *convexos*, *esféricos*, *parabólicos*, *cónicos*, etc.

Se llama *espejo plano* á toda superficie plana tan bien pulimentada como es posible. El *baño pelicular de mercurio* (348) constituye un espejo plano perfecto. Tomaremos como tipos de espejos planos unas placas de bronce perfectamente pulimentadas, que se denominan *espejos metálicos*.

352. **Formación de las imágenes por los espejos planos.** — 1°. *Caso de un punto luminoso.* — Sea un punto único A, luminoso ó iluminado, que se coloca delante de un espejo plano MN (fig. 334). Sea AN la normal al espejo; tomemos como plano de la figura uno que pase por AN : éste es normal al espejo y corta su superficie según MN. Como este plano es evidentemente de simetría de la figura, sólo tenemos que considerar lo que en él ocurre, y todas las construcciones serán planas.

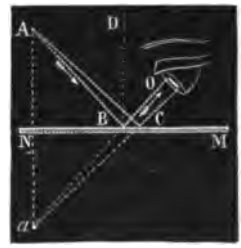


Fig. 334.

Un rayo AB que encuentra al espejo, se refleja en él según la dirección BO, formando el ángulo de reflexión DBO igual al de incidencia ABD. Prolonguemos el rayo OB hasta que encuentre en un punto *a* la prolongación de la normal AN : fórmanse dos triángulos ABN y *a*BN, que son iguales, por tener un lado común BN compren-

dido entre dos ángulos iguales (ANB = *a*NB = 90°; ABN = *a*BN = OBM). De ahí resulta que *a*N es igual á AN : luego un rayo cualquiera AB toma después de la reflexión una dirección tal que su prolongación va á cortar la perpendicular A*a* en un punto *a*, simétrico de A respecto del espejo. Esta propiedad se aplica evidentemente á cualquier otro rayo AC : luego todos los rayos emitidos por el punto A, y reflejados en el espejo, siguen, *después de la reflexión*, el mismo camino que si procedieran del punto *a*. Ahora bien, *como la vista percibe siempre un punto luminoso en los de divergencia de los haces de luz que distingue*, el punto *a* le aparece como si fuera realmente luminoso : esto es lo que se llama la *imagen* del punto A. Esta imagen se denomina *virtual*, porque no existe realmente en el espacio, sino que se reduce al punto de reunión *virtual* de las prolongaciones geométricas de los rayos luminosos reflejados.

De modo que, *todo espejo produce una imagen virtual de un punto luminoso situado delante de él, que es simétrica del punto respecto del plano del espejo.*

2°. *Caso de un objeto luminoso.* — Es evidente que se obtendrá la imagen de un objeto luminoso cualquiera construyendo, con sujeción á la regla anterior, la imagen de cada uno de sus puntos, ó por lo menos de los que bastan para determinar su posición y forma. La figura 335 representa la construcción de la imagen *ab* de una flecha AB.

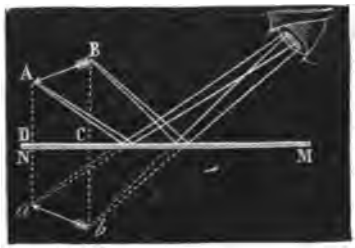


Fig. 335.

Observase que los espejos planos *dan una imagen del mismo tamaño que el objeto*, pues si se proyecta el trapecio ABCD sobre el CD*ab*, se observa que coinciden y que el objeto AB se confunde con su imagen.

De ahí resulta también que la imagen es *simétrica* del objeto, quiere decir, que todos sus puntos se encuentran situados dos á dos con la misma perpendicular al espejo y á igual distancia por una y otra parte.

Observación. — Se ve finalmente la marcha de los rayos emitidos por cada punta A, B, reflejados en el espejo y recibidos al fin por la vista del observador.

353. **Campo de un espejo plano.** — Sea un punto luminoso O situado delante de un espejo MN, que dé una imagen O′ de éste (fig. 336). Todos los rayos luminosos que contribuyen á la formación de esta imagen están comprendidos en un cono que tiene por vértice el punto O y por base la superfice MN. El cono que tiene la misma base y por vértice la imagen O′ es el lugar geométrico de los rayos reflejados procedentes del punto luminoso. En este espacio es

donde hay que colocar la vista para distinguir la imagen del punto luminoso : algunas veces se le define diciendo que es el *campo* del espejo, *relativamente á este punto.*

Pero el campo de un espejo debe definirse más bien diciendo que es *la parte del espacio visible* para el observador en una posición dada. Si la vista está en O, se observa que el campo está definido por el cono $O'MM_1N_1N$, pues todo rayo incidente comprendido en este espacio tendrá un ángulo de incidencia intermedio entre los de los rayos extremos MM_1 y NN_1, y se reflejará necesariamente de modo que pase por el punto O.

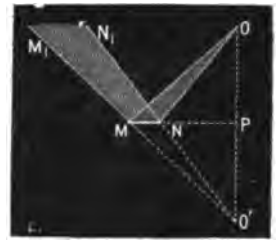


Fig. 336.

354. **Imágenes virtuales é imágenes reales.** — Hay que distinguir dos casos en la reflexión por los espejos planos : el haz reflejado puede ser *divergente* ó *convergente.* En el primer caso los rayos reflejados no se encuentran; pero sus prolongaciones concurren á un mismo punto : entonces forman una *imagen virtual* (fig. 334 y 335). En el segundo caso, los rayos reflejados son convergentes y van á reunirse hacia un punto situado delante del espejo y por la misma parte que el objeto. Allí forman la llamada *imagen real,* para indicar que existe realmente, pues se la puede recibir en una pantalla.

Las imágenes reales se obtienen ordinariamente con ayuda de los espejos cóncavos ó de las lentes convergentes. Pero los espejos planos pueden suministrar también imágenes *reales.* Este caso se realizaría interponiendo un espejo plano MN (fig. 336) en el trayecto de un haz convergente hacia el punto O' : este haz, detenido en su propagación por el espejo, sería rechazado hacia delante y reflejado de modo que iría á converger hacia el punto O. De modo que este punto O es lo que constituiría una *imagen real,* al paso que O', que sólo es el punto de reunión geométrica de los rayos prolongados hacia el otro lado del espejo, vendría á ser únicamente un *punto luminoso virtual.*

355. **Espejos estañados. — Imágenes múltiples.** — Los espejos metálicos no tienen *más que una* superficie reflectora y *sólo producen una imagen.* No ocurre lo mismo con los de vidrio estañado; éstos presentan : 1°. una superficie anterior de vidrio MN (fig. 337) donde se reflejan primero los rayos incidentes; 2°. una capa de amalgama metálica, ó *estañado,* que cubre la cara posterior. La primera superficie da del punto A una primera imagen *a*, formada por la prolongación de los rayos reflejados tales como *b*E; la otra parte penetra en el vidrio, se refleja en *c* sobre la capa de estaño, vuelve á la vista siguiendo la dirección *d*H y produce la imagen *a'*. Ésta dista de la primera doble del grueso del espejo y es mucho más intensa, porque los metales pulimentados tienen poder reflector mucho mayor que el vidrio. Hay también otras imágenes que resultan de las reflexiones que la luz experimenta sucesivamente en la superficie interna de las caras superior é inferior del espejo. Por lo demás, como cada una de estas reflexiones va acompañada de refracción y de difusión, hay una pérdida de

luz considerable que debilita las imágenes y acaba por hacerlas invisibles. En la fig. 338 pueden verse las imágenes múltiples de una bujía cuando se mira oblicuamente la cara reflectora de una lámina de vidrio de caras paralelas que constituye un espejo análogo á los estañados.

Fig. 338.

356. **Imágenes múltiples dadas por dos espejos inclinados.** — Cuando se coloca un objeto entre dos espejos cuyos planos se cortan en ángulo más ó menos

Fig. 337.

agudo, se ven imágenes múltiples, cuyo número aumenta con la inclinación de los espejos.

Por ejemplo, si éstos son *perpendiculares* uno á otro, se ven tres imágenes (fig. 339) del punto O, á saber : O′ y O″, que proceden de rayos tales como OC y OD, que han sufrido una reflexión ; O‴,

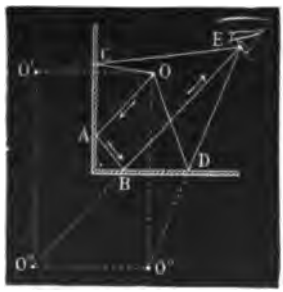


Fig. 339.

Fig. 340.

que proviene de rayos como OA, que han sufrido dos reflexiones, en A y en B. Los cuatro puntos luminosos O, O′, O″ y O‴ forman los vértices de un rectángulo cuyo plano es perpendicular á la intersección de los dos espejos y que tiene su centro en esta intersección.

Si *el ángulo de los espejos es de* 60°, se forman *cinco imágenes;* si es de 45°, *siete* (fig. 340). El número de imágenes continúa creciendo á medida que el ángulo disminuye.

Si el ángulo de los espejos no es una parte alícuota de la circunferencia, se tiene análogamente una serie de imágenes situadas en una circunferencia perpendicular á la intersección de los dos espejos y que tienen su centro en esta intersección. Las imágenes virtuales debidas á cada espejo se convierten en objetos luminosos respecto del otro hasta que lleguen esas imágenes á caer en el ángulo formado por las prolongaciones mismas de los espejos (tal es la 7ª imagen de la figura 340). Entonces dejan de reflejarse en uno ú otro espejo; vuélvense *improductivas* y termina la serie[1].

357. **Calidoscopio.** —]En la propiedad de los espejos inclinados se funda el *calidoscopio*, pequeño aparato ideado por Brewster. Está constituído por un tubo de cartón donde hay dos espejos inclinados entre sí 45°, ó tres inclinados 60°. Diferentes objetos menudos de forma irregular, como pedazos de vidrio de

Fig. 341.

color, musgo ó encaje se colocan en uno de los extremos entre dos placas de vidrio, uno transparente y otro que no lo es. Cuando se mira por la otra extremidad se distinguen estos objetos y sus imágenes simétricamente dispuestos, lo que forma un conjunto muy variado y más ó menos bonito (fig. 341).

358. **Imágenes múltiples producidas por dos espejos paralelos.** — En el caso de dos espejos paralelos, el número de las imágenes de

1. Véanse los Annales de chimie et de physique, 3ª serie, t. XXIX : *Sur les miroirs inclinés*, por Bertin.

los objetos colocados entre ellos es *teóricamente infinito*. Físicamente este número es limitado, porque la luz incidente no se refleja nunca en totalidad, y por tanto las imágenes van perdiendo cada vez más brillo acabando por extinguirse enteramente.

En el caso de un objeto O que tiene una cara y un revés (fig. 342), la construcción ordinaria de las imágenes da detrás de cada espejo

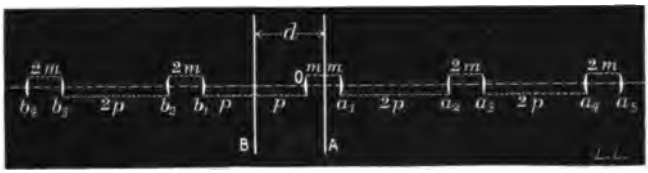


Fig. 342.

una serie de imágenes virtuales en línea recta, paralelas entre sí y vueltas dos á dos en sentidos contrarios. Si el alejamiento de los dos espejos es d y m y p la distancia del objeto á los espejos A y B, es fácil ver que : 1°. dos imágenes consecutivas que están frente á frente distan $2m$; 2°. dos imágenes opuestas consecutivas distan $2p$; 3°. dos imágenes consecutivas que están en la misma posición distan $2d$.

359. **Problema del espejo giratorio.** — Cuando se hace girar un espejo M un ángulo θ alrededor de un eje O situado en su plano (fig. 343), la imagen de un punto luminoso A experimenta un movimiento angular doble del que tiene el espejo, y lo mismo ocurre con un rayo reflejado IR cualquiera.

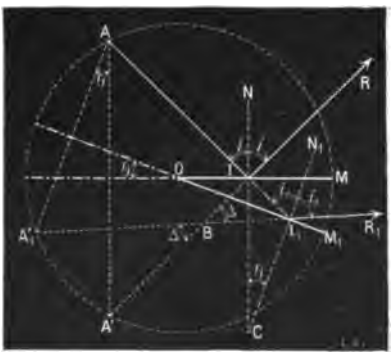


Fig. 343.

En efecto, describamos desde el punto O como centro, con un radio igual á OA, un círculo que servirá para valorar suficientemente los movimientos angulares. Las imágenes A y A'_1 son simétricas del punto A respecto de las dos posiciones M y M_1 del espejo. Ahora bien, el ángulo de las dos normales A' M' es evidentemente igual á θ, y como es un ángulo inscrito, que tiene por medida la mitad del arco A'_1 A, resulta que este arco es igual á 2θ.

Consideremos ahora un rayo cualquiera AI, que se refleja en IR, en la primera posición del espejo. Cuando éste va á M_1, el mismo rayo incide en I_1, y se refleja según $A_1 I_1 R_1$. El ángulo que el rayo reflejado acaba de girar es $\Delta = R_1 CR$. Ahora bien, en el triángulo CII_1, el ángulo exterior $II_1 R_1$ da

$$2 i_1 = 2 i + \Delta,$$

de donde

$$\Delta = 2 (i_1 - i);$$

y en el triángulo DII_1, se tiene el ángulo exterior

$$i_1 = i + \theta,$$

de donde

$$i_1 - i = \theta,$$

luego

$$\Delta = 2\theta.$$

Este hecho es el principio del *Método de Poggendorff* para la medida de los ángulos pequeños, así como del *sextante* y del *círculo repetidor de reflexión* de Borda, aparatos que sirven en el mar para medir la distancia de dos puntos.

360. **Aplicación de los espejos.** — Conocidas son las aplicaciones de los espejos planos en la economía doméstica. Estos aparatos son también de uso frecuente en varios aparatos de física para dar á la luz dirección determinada.

Helióstato. — Si lo que se desea dirigir es la luz solar, no es posible conservar á los rayos reflejados dirección constante sino en tanto cuanto el espejo es móvil. En efecto, precisa comunicar á éste un movimiento que compense el cambio de dirección que sin cesar toman los rayos incidentes, en virtud del movimiento aparente del sol. Este resultado se obtiene por medio de un movimiento de relojería que hace variar la inclinación del espejo gracias á su vástago donde está fijo. El aparato en cuestión ha recibido el nombre de *helióstato.*

Goniómetro. — La reflexión de la luz fué utilizada también por Wóllanston para medir con gran rigor los ángulos de los cristales, valiéndose de aparatos conocidos por el nombre de *goniómetros de reflexión.* Hablaremos de este método al tratar de la medida de los índices de refracción.

ESPEJOS CURVOS.

361. **Espejos esféricos. — Definiciones.** — Ya se ha visto (351) que hay varias clases de espejos curvos : los más usados son los *espejos esféricos* y los *parabólicos.*

Llámase *espejos esféricos* á aquellos cuya superficie es una porción ó *casquete* de esfera. Según se pulimenta su superficie interna ó la externa, así es el espejo *cóncavo* ó *convexo.* El centro C de la esfera de que el espejo forma parte (fig. 344) es su *centro de curvatura;* el punto A, centro del arco MN, es su *vértice.* La recta indefinida AL, trazada por los puntos A y C, es el *eje principal* del espejo; toda recta que pasa por C sin hacerlo por A es un *eje secundario.*

Fig. 344.

Se denomina *sección principal* del espejo toda sección plana que pasa por el eje principal. Finalmente, la *abertura* de un espejo es el ángulo en el centro MCN, subtendido por una sección principal.

La aplicación de las leyes de la reflexión á los espejos curvos se efectúa fácilmente suponiendo formada su superficie por una infidad de *elementos* planos, infinitamente pequeños. La *normal* á la

superficie curva, en un punto dado, es entonces la perpendicular al elemento correspondiente, ó lo que es lo mismo, al plano tangente que lo contiene : en el caso de los espejos esféricos, la normal en un punto es, por tanto, sencillamente el *radio* geométrico en este punto.

362. **Espejos cóncavos. — Estudio geométrico y experimental. (Caso de los rayos centrales).** — Este estudio se funda en la aplicación de las leyes de la reflexión á espejos de *pequeña abertura*, quiere decir, cuyo ángulo en el centro no pase de 8 á 9 grados, y que sólo admitan *rayos centrales,* es decir, rayos paralelos al eje principal ó muy poco inclinados y muy próximos á este eje.

Cuando el objeto luminoso está simétricamente colocado respecto del eje principal, todos los fenómenos son simétricos á su vez relativamente á una de las secciones principales. Esto permite simplificar las construcciones relativas á la determinación de las imágenes, reduciéndolas en todos los casos *á construcciones planas*, hechas en el plano de la sección principal.

363. **Definición de los focos.** — La *experiencia prueba* que un espejo cóncavo da una imagen clara (real ó virtual) de un objeto luminoso colocado delante de él. De aquí debe deducirse que á cada punto luminoso del objeto corresponde un punto luminoso *único* en la imagen ; este último es, ya el lugar de reunión de todos los rayos reflejados que proceden de un mismo punto luminoso, ya el de reunión de sus prolongaciones; en el primer caso se le llama *foco real* y *foco virtual* en el segundo.

364. **Foco principal. — Definición y determinación.** — Cuando un haz luminoso incide sobre un espejo cóncavo esférico paralelamente al eje principal, *todos los rayos van después de la reflexión á reunirse visiblemente en un mismo punto* F *situado á igual distancia del centro de curvatura y del espejo :* este es el *foco principal*, siempre *real.*

En efecto, sea un haz de rayos paralelos al eje principal (fig. 346) y SI uno de ellos (fig. 345). Este rayo se refleja en el elemento que

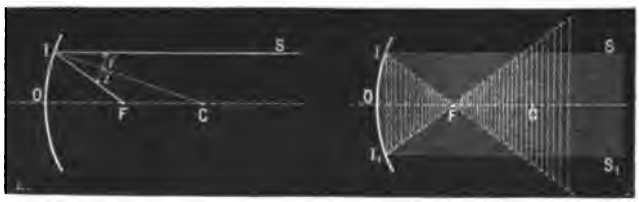


Fig. 345. Fig. 346.

corresponde al punto I de manera que el ángulo de reflexión CIF sea igual al de incidencia SIC y esté situado en la misma sección principal. Por consiguiente, en el triángulo IFC, los lados IF y CF son iguales como opuestos á ángulos iguales; pues los ángulos ICF

y FIC son ambos iguales al ángulo SIC, el primero por alterno-interno y el segundo con arreglo á las leyes de la reflexión. Por lo demás, FI está tanto más cerca de ser igual á FO cuanto más pequeño es el arco OI, y en los espejos de *pequeña abertura* se puede admitir que *las rectas* FI *y* FO *son exactamente iguales, y que el punto* F *es el centro de* OC. El mismo razonamiento se aplica á cualquier otro rayo S_1I_1 del haz (fig. 346).

Esta propiedad del foco principal indica su construcción : basta tomar FO = FC. La distancia FO es la *distancia focal principal.* Represéntasela por *f;* llamando R el radio de curvatura del espejo, se tiene $f = \frac{1}{2}$ R.

Recíproca. — Si se supone en F un punto luminoso, los rayos emitidos por él toman, después de la reflexión, direcciones IS, I_1S_1, paralelas al eje principal (fig. 346). En efecto, los ángulos de reflexión se convierten en ángulos de incidencia, é inversamente, pero estos ángulos permanecen siempre iguales. Luego, hallándose situado un punto luminoso en el foco principal de un espejo cóncavo, el *haz divergente* que sale de este punto se transforma por reflexión en el espejo en un *haz paralelo al eje.*

La figura 346 hace ver como un haz paralelo SIS_1I_1 es transformado por la reflexión en un haz convergente II_1F; y como, inversamente, un haz divergente FII_1 es transformado en un haz paralelo ISI_1S_1.

365. **Caso de los puntos luminosos. — Focos conjugados.** — Llámase *focos conjugados* á todo punto luminoso y su imagen. Los focos conjugados pueden ser, uno ú otro, *reales* ó *virtuales.* He aquí como se les determina.

I. *Punto luminoso situado en el eje principal.* — Supongamos el punto L (fig. 347) más allá del foco principal y á una distancia *finita :* los rayos incidentes no son ya paralelos, sino divergentes. Siendo el foco conjugado *l* el punto de reunión de todos los rayos reflejados, basta construir dos de estos rayos. Observemos primeramente que el rayo emitido por L, según el eje principal LA, es reflejado en la misma dirección, puesto que es normal al espejo (fig. 347). Entonces basta con trazar otro rayo incidente tal como LI, la normal IC, después el rayo reflejado I*l* que forma un ángulo CIL = LKC (fig. 348) : el foco conjugado que se busca es el punto de cruce *l* con el eje principal.

Fig. 347.

Observaciones. — 1°. Los dos puntos L y *l* son *recíprocos* uno de otro, quiere decir que si el punto luminoso fuera transportado á *l*, su

foco conjugado estaría en L, viniendo á ser *l*K el rayo incidente y KL el reflejado.

2°. Cuando el punto L se acerca ó se aleja del centro C, su foco conjugado se acerca ó se aleja còn él (fig. 348): pues los ángulos de incidencia y de reflexión crecen ó disminuyen al mismo tiempo.

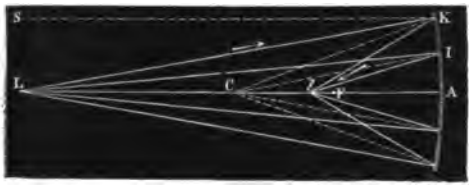


Fig. 348.

3°. Si L va á coincidir con el centro C, el ángulo de incidencia es nulo; y como debe ocurrir lo mismo con el de reflexión, el rayo incidente vuelve sobre sí mismo: *el foco coincide con el punto luminoso* (fig. 348).

4°. Cuando éste pasa más acá del centro C, entre este punto y el foco princìpal, el foco conjugado pasa al otro lado del centro, y se aleja de él á medida que el punto luminoso se acerca al eje principal.

5°. Si el punto luminoso va á coincidir con el foco principal, los rayos son reflejados paralelamente al eje y dejan de encontrarse; por tanto, *ya no hay foco conjugado.* Á veces se expresa este hecho diciendo que *el foco ha sido enviado á lo infinito sobre el eje principal.*

6°. *Foco virtual.* — Supongamos por fin al punto luminoso situado (fig. 349) entre el foco principal y el espejo. Un rayo cualquiera LM forma entonces con la normal CM un ángulo de incidencia LMC mayor que FMC; el ángulo de reflexión debe en consecuencia ser mayor que el CMS. De aquí se sigue que el rayo reflejado ME es divergente respecto del eje AK. Como lo mismo ocurre para todos los rayos emitidos desde el punto L, ni siquièra los reflejados se encuentran, pero sus prolongaciones van á reunirse en un mismo punto *l* situado sobre el eje, detrás del espejo: este punto luminoso *virtual* es el foco conjugado del punto luminoso real.

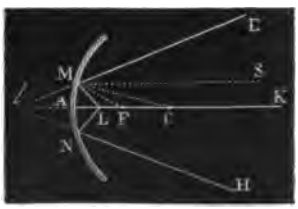


Fig. 349.

II. *Punto luminoso situado fuera del eje principal.* — Su foco conjugado es, lo mismo que antes, el punto de reunión de todos los rayos reflejados. Basta con hacer dos; se elegirán los más cómodos.

El rayo luminoso LC (fig. 350), que pasa por el centro de curvatura, incide normalmente sobre el espejo y se refleja siguiendo su propia dirección. La imagen se encuentra, pues, en esta línea, que

desempeña por consiguiente, respecto del punto luminoso, el mismo papel que el eje principal en el caso precedente : por esto se la llama *eje secundario* del punto L. Si ahora se traza el rayo LI, paralelo al eje principal, su rayo reflejado debe pasar por el foco principal (364) y se le obtiene inmediatamente trazando la recta IF; prolongada ésta, va á cortar al eje secundario LC en un punto *l*, que es evidentemente el foco conjugado apetecido.

Fig. 350.

Observación. — Este foco conjugado puede ser *real* ó *virtual*, según la posición del punto conjugado respecto del plano del foco principal.

III. *Determinación experimental de los focos.* — 1°. *Foco principal.* — Recíbese en el espejo un haz solar, en una dirección paralela al eje principal, y se busca, en una pantalla de vidrio sin pulimentar ó de cartón, el lugar donde la luz reflejada se concentra con más brillo : allí es donde está el *foco principal.*

2°. *Focos conjugados.* — Los focos conjugados se determinan de la misma manera, poniendo una bujía encendida en el punto cuyo foco se desea obtener, y buscando el lugar donde el vértice del haz reflejado presenta mayor brillo.

366. **Caso de objetos luminosos : Construcción de las imágenes.** — Como un objeto luminoso cualquiera se compone de puntos luminosos, su imagen se construirá por puntos, en todos los casos, aplicando las reglas anteriores.

1°. *Objeto situado más allá del centro.* — Sea un objeto AB, situado delante de un espejo cóncavo perpendicularmente al eje principal

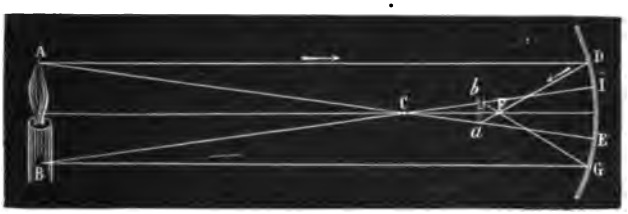


Fig. 351.

(fig. 351). Aplicando las construcciones precedentes, se hallará en *a* y el eje secundario AE, la imagen del punto A. Del mismo modo, el punto B va á formar su imagen en *b* sobre el eje secundario de

este punto. Se tiene pues en *ab* la imagen AB. *Esta imagen es real, invertida, está situada entre el centro de curvatura y el foco principal :* es tanto más pequeña respecto del objeto, cuanto más lejano se encuentra éste.

2°. *Objeto situado más acá del centro.* — *Recíprocamente*, si el objeto estuviera en *ab* (fig. 351), entre el foco principal y el centro, su imagen se formaría en AB. También sería *real é invertida*, pero *mayor que el objeto*, y tanto más cuanto más cerca del foco principal estuviera *ab*. La figura 356 hace ver la imagen *real* de una llama de bujía.

3°. *Objeto situado en el plano focal principal.* — Entonces no se produce ninguna imagen (fig. 352). En efecto el haz de los rayos tales como AI y AK, procedentes del punto A, da después de la reflexión un haz KIGH paralelo al eje secundario CK, y los rayos emitidos del punto B un haz paralelo á BC (354, recíproco) : estos haces no pueden formar en consecuencia ni focos ni imágenes, y los focos conjugados de cada uno de los puntos del objeto *van á parar á lo infinito*, cada uno en la dirección de su eje secundario.

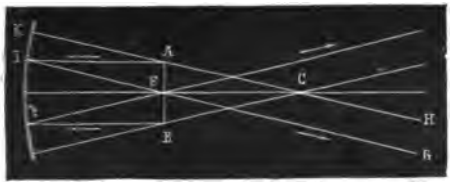


Fig. 352.

4°. *Objeto situado más acá del plano focal principal.* — Sea AB el objeto (fig. 353) ; tracemos primero el eje secundario del punto CA ; y después el rayo AD paralelo al eje principal que se refleja según DF. Ahora bien, este rayo reflejado debe cortar al secundario *por detrás* del espejo, en *a*, y no por delante, pues la figura DAFC es un trapecio, de que AD es la base menor, puesto que AD′ es más pequeño que la mitad del radio. Análogamente, el rayo trazado desde el punto B paralelamente al eje da en *b* la imagen del punto B. La vista que recibe el haz reflejado ve, pues, en *ab* una imagen AB, *virtual*, *recta* y *mayor que el objeto*. La figura 354 representa la imagen virtual de una llama de bujía.

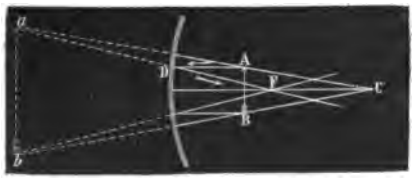


Fig. 353.

Observaciones. — 1°. Cuando el objeto *ab* tiene todos sus puntos fuera del eje principal (fig. 355), se encuentra por la construcción anterior que la imagen se forma en *a′b′*, al otro lado del eje AB.

2°. *Imágenes aéreas.* — Debe observarse que es posible ver las imágenes reales de dos maneras : 1°. recibiéndolas en una pantalla que

Fig. 354.

las hace visibles en todas direcciones por difusión (fig. 356); 2°. poniendo la vista más allá de la imagen, de modo que reciba los rayos reflejados sus productores. Entonces se distingue en el espacio una *imagen* llamada *aérea.*

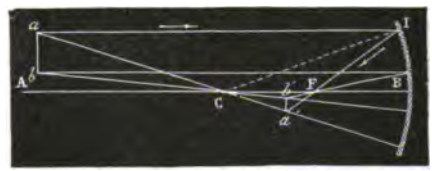


Fig. 355.

367. **Espejos convexos. Estudio geométrico y experimental. (Caso de los rayos centrales).** — Este estudio se funda, como al tratar de los espejos cóncavos, en la aplicación de las leyes de la reflexión á espejos de *pequeña abertura*, que sólo admiten *rayos centrales.* Todas las construcciones son planas, lo mismo que en los casos precedentes, y por idénticas razones. — Los espejos convexos no dan sino *focos virtuales* cuando los puntos luminosos son *reales*, — según es lo general. Pero pueden dar, como los espejos planos, imágenes *reales*, en el caso particular de haces incidentes que convergieran hacia puntos luminosos *virtuales.*

1°. *Foco principal.* — Sean primero los rayos SI, TK (fig. 357), paralelos al eje principal de un espejo convexo. Estos rayos toman, después de su reflexión,

direcciones divergentes IM, KH,... que al prolongarse van á coincidir en un

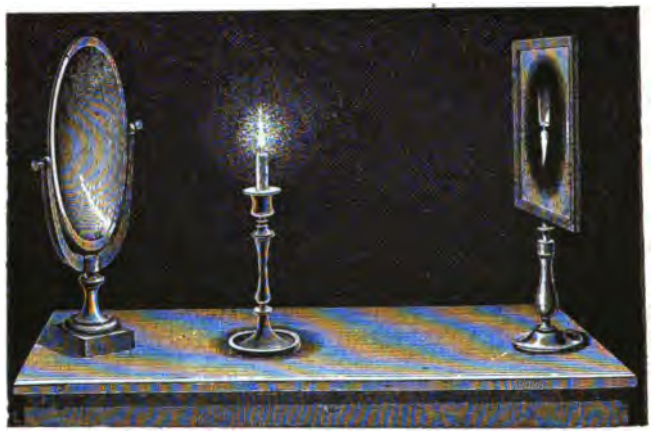


Fig. 356.

punto F, que es un *foco virtual:* este es el *foco principal* del espejo. Considerando

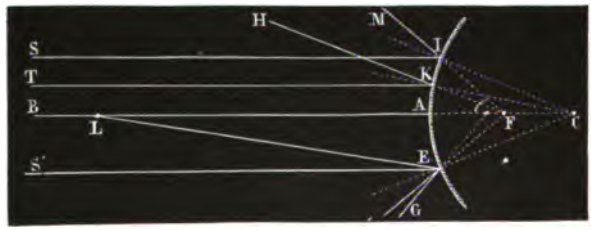


Fig. 357.

el triángulo CKF, que es isósceles, se demostraría, como para los espejos cóncavos, que F es el centro de CA.

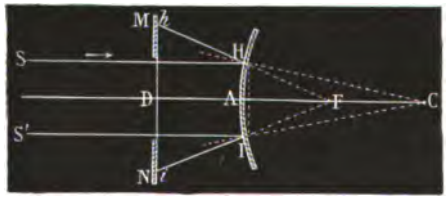


Fig. 358.

2°. *Focos conjugados.* — Si los rayos salen de un punto L, situado en el eje, á una distancia finita, el foco conjugado es también *virtual;* va á formarse en *l*, *entre el foco principal* F *y el espejo.* Cuando el punto luminoso se mueve á lo largo del eje principal. desde lo infinito hasta el vértice A, su foco conjugado, *siempre virtual*, se mueve desde el foco principal F hasta el vértice A.

3°. *Determinación experimental del foco principal.* — Cúbrese el espejo con una hoja de papel, teniendo cuidado de reservar en ésta, á igual distancia del centro

de figura A, y en una misma sección principal (fig. 358), dos pequeños agujeros en H é I, que dejan á descubierto el espejo. Después se coloca delante del espejo una pantalla MN, taladrada en su centro por una abertura circular mayor que la distancia HI. Si se recibe en el espejo un haz de rayos solares SHS'I, paralelos al eje, la luz se refleja en H y en I, en los puntos donde el espejo está á descubierto, y va á formar dos rasgos brillantes en *h* é *i* sobre la pantalla. Haciendo retroceder á ésta, ó aproximándola, se halla una posición en que $hi = 2\,\mathrm{HI}$: *la distancia* AD *de la pantalla al espejo representa entonces la distancia focal principal.*

En efecto, como el pequeño arco HAI se confunde sensiblemente con su cuerda, los triángulos semejantes FHI y F*hi* dan

$$\frac{\mathrm{HI}}{hi} = \frac{\mathrm{FA}}{\mathrm{FD}};$$

pero siendo HI la mitad de *hi*, FA es la mitad de FD; luego AD es sensiblemente igual á AF. Por lo demás, puesto que los rayos SH y S'I son paralelos al eje, FA es la distancia focal principal; luego AD representa bien esta distancia.

4°. *Construcción de las imágenes.* — Sea un objeto AB (fig. 359) situado á una distancia cualquiera, perpendicularmente al eje principal. Tíranse los ejes secundarios AC y BC, y los rayos AK y BI paralelos al eje principal: sábese que la prolongación del rayo reflejado en K debe ir á pasar por F: reúnense, pues, el punto K y el F por medio de la recta KF, que corta al eje secundario AC en un punto *a*: este es el foco virtual de A. El de B se obtiene análogamente en *b*. La vista que recibe los rayos reflejados ID y KH ve en *ab* la imagen de AB, *imagen virtual, recta y más pequeña que el objeto.*

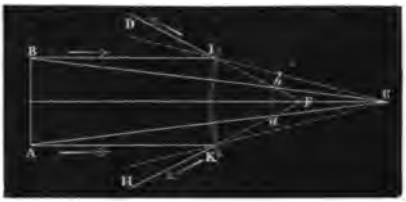


Fig. 359.

5°. **Aplicación** : *Globo periscópico.* — Las dimensiones de la imagen son tanto más pequeñas cuanto más lejos del espejo se encuentra el objeto. Por tanto, si todas las partes del objeto no están á la misma distancia, lo que pasa sea cuando el objeto no es simétrico respecto del eje principal, sea cuando los rayos luminosos que envía de sus diferentes puntos son, unos centrales, otros periféricos, se observará una deformación más ó menos pronunciada de la imagen. Así ocurre en el *globo periscópico* (fig. 360), que es un espejo convexo de vidrio negro ó de estañado, análogo á los que se ponen en los jardines y que reflejan, deformándolos, el paisaje y objetos inmediatos.

368. **Fórmulas de los espejos esféricos cóncavos de pequeña abertura.** — 1°. *Ecuación de los focos conjugados.* — Llámase así á la relación que existe entre la distancia de un punto luminoso al vértice de su espejo y la de su imagen. Consideremos un espejo cóncavo MN; sean R su radio de curvatura, *p* la distancia LA del punto luminoso L al espejo (fig. 361) y *p'* la distancia *l*A de la imagen. En el triángulo LM*l*, como la normal MC divide al ángulo LM*l* en dos partes iguales, se tiene, según el *teorema de la bisectriz*,

$$\frac{\mathrm{C}l}{\mathrm{CL}} = \frac{l\mathrm{M}}{\mathrm{LM}}, \qquad \text{de donde} \qquad \mathrm{C}l \times \mathrm{LM} = \mathrm{CL} \times l\mathrm{M}.$$

Ahora bien, si el arco AM no pasa de 8 á 9 grados, las líneas ML y

Fig. 360.

Ml son muy sensiblemente iguales á AL y Al, es decir, á p y á p'. Por lo demás

Fig. 361.

$$Cl = CA - Al = R - p'$$

y

$$CL = AL - AC = p - R.$$

Sustituyendo estos diversos valores en la igualdad que precede, se obtiene

$$(R - p')\,p = (p - R)\,p', \quad \text{ó} \quad Rp - pp' = pp' - Rp';$$

transportando y reduciendo, se halla

$$Rp + Rp' = 2\,pp'.$$

Si se dividen todos los términos de esta igualdad por el producto $pp'R$, y se suprimen los factores comunes, se convierte en

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{R},$$

y como se tiene

$$f=\frac{R}{2}, \quad \text{de donde} \quad \frac{1}{f}=\frac{2}{R},$$

la ecuación toma la forma

$$[1] \qquad \frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}.$$

Tal es la forma ordinaria de la *ecuación de los focos conjugados*, que también se llama *fórmula de los espejos cóncavos.*

Observación. — Resolviendo la ecuación [1] con relación á p' se deduce de ella

$$[2] \qquad p'=\frac{pf}{p-f} \quad \text{ó bien} \quad \frac{f}{1-\frac{f}{p}}, \qquad [2\ bis]$$

fórmula que da á conocer la distancia de la imagen al espejo, cuando se sabe la del punto luminoso y el rayo de curvatura.

369. Discusión de la fórmula de los espejos cóncavos. — Averigüemos ahora los distintos valores que toma p' según los que se atribuyen á p.

I. $p=\infty$, es decir que *el punto luminoso está colocado en el eje principal á distancia infinita.*

Introduciendo este valor de p en la fórmula [2], resulta $p'=f$: esto quiere decir que *la imagen se forma en el foco principal;* lo que debía ser, toda vez que entonces los rayos incidentes forman un haz paralelo al eje.

II. p *disminuye*, quiere decir que *el punto luminoso se aproxima al espejo.*

Entonces el denominador de la fórmula [2] disminuye y el valor de p', aumenta, por consiguiente, la imagen se acerca al centro al mismo tiempo que el objeto. Por lo demás, queda comprendida entre el foco principal y el centro mientras $p>R$, pues para un valor de p igual á $2f+\varepsilon$ se tiene al mismo tiempo

$$\frac{1}{1-\frac{f}{p}}> \qquad \text{y} \qquad <2.$$

III. $p=R=2f$, es decir que *el punto luminoso coincide con el centro.*

Haciendo $p=2f$ en la fórmula [2 *bis*], ésta da $p'=2f$, quiere decir que *la imagen coincide con el punto luminoso.*

IV. $p<2f$, es decir que *el punto luminoso está entre el centro y el foco principal.*

La fórmula [2 *bis*] hace ver que p' es $>2f$, ó en otros términos, que entonces *la imagen se forma al otro lado del centro.*

V. $p=f$, es decir que *el punto está en el foco principal.*

La fórmula da $p'=\frac{P}{0}=\infty$, quiere decir que *la imagen es enviada al infinito.*

En efecto, entonces los rayos reflejados son paralelos al eje.

VI. $p<f$, quiere decir que *el punto luminoso está entre el foco principal y el espejo.*

Como entonces es negativo el denominador de la fórmula [2], ocurre lo mismo

con p', lo que indica que la fórmula no conviene al caso. No debe extrañarnos que así ocurra, pues se la dedujo suponiendo que existía una imagen real. Ahora bien, si se empezara otra vez el mismo cálculo haciendo la suposición inversa, quiere decir, admitiendo la existencia de una imagen virtual, se encontraría la ecuación de los focos conjugados en la forma siguiente,

$$[1\ bis] \qquad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

de donde se sacaría la fórmula

$$p' = \frac{pf}{f-p}.$$

Ésta daría para p' valores positivos y perfectamente admisibles con todos los valores de p inferiores á f. Lo cual prueba que en todas las posiciones del punto luminoso comprendidas entre el foco principal y el vértice *se tiene una imagen virtual*, cuya distancia al espejo viene dada por la fórmula [2 *bis*].

Observación. — Para representar los diversos casos que pueden ocurrir en la reflexión sobre un espejo cóncavo, hay que emplear las dos ecuaciones [1] y [1 *bis*]. Sin embargo, es posible contentarse con una, admitiendo lo convenido en álgebra sobre la interpretación de las cantidades negativas. Si se admite de antemano que los valores negativos de p' corresponderán á las imágenes virtuales, la ecuación

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

comprenderá todos los casos.

370. **Fórmulas de los espejos convexos de pequeña abertura.** — 1°. *Ecuación de los focos conjugados.* — Es fácil hallarla directamente, por el mismo método que al tratarse de los espejos cóncavos. Colocándose en el caso de una imagen virtual se llega á la ecuación

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{2}{R} = -\frac{1}{f},$$

ó cambiando los signos de ambos miembros,

$$[1] \qquad \frac{1}{p'} = -\frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Observación. — Se podría deducirla de la ecuación fundamental [1] cambiando de signo todas las magnitudes geométricas que han variado de sentido *relativamente al caso inicial de un espejo cóncavo que da una imagen real de un punto luminoso real.*

Discusión. — De esta ecuación se deduce

$$[2] \qquad p' = \frac{pf}{p+f}.$$

Discutiendo la fórmula como anteriormente, se vería que siempre da un valor admisible, sea p cual fuere : lo que prueba que se aplica á todos los casos y que *la imagen de un punto luminoso real es siempre virtual en un espejo convexo.*

371. **Fórmula de Newton.** — Débese á Newton una forma de la ecuación de los focos conjugados, que se aplica tanto al caso de los espejos convexos como al de los cóncavos. Basta tomar como origen de las distancias al foco principal F y suponer

$$LF = \omega \quad \text{y} \quad lF = \omega' \text{ (fig. 347).}$$

Entonces se tiene

$$p = \omega + f \quad \text{y} \quad p' = \omega' + f.$$

Llevando estos valores á la ecuación [1] resulta, después de simplificar,

$$\omega\omega' = f^2.$$

372. **Caso de los objetos luminosos.** — 1°. *Distancia de la imagen al espejo.* — Las

ecuaciones de los focos conjugados expresan también la relación que existe entre las distancias del objeto y de su imagen al vértice del espejo.

2ª. *Magnitud de la imagen.* — Por medio de las mismas fórmulas se puede calcular fácilmente la magnitud de una imagen cuando se conoce la distancia del objeto, su tamaño y el radio del espejo. En efecto si se representa el objeto por BD (fig. 362), su imagen por *bd*, y si se suponen conocidos la distancia KA = p y el radio AC = $2f$, se calcula Ao = p' por medio de una de las dos fórmulas ya apuntadas. Ahora bien, siendo semejantes los triángulos BCD y *dCb*, se tiene entre sus bases y sus alturas la proporción

Fig. 362.

$$\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CK} = \frac{R - p'}{p - R} = \frac{p'}{p};$$

luego

$$\frac{bd}{BD} \quad \text{ó} \quad \frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p - f}.$$

373. **Caso de los espejos de gran abertura. — Rayos marginales; aberración de esfericidad; cáusticas por reflexión.** — Cuando la abertura del espejo pasa de 8 á 9 grados, los rayos reflejados cerca de los bordes van á encontrar el eje en un foco G, más próximo al espejo que el foco F de los rayos centrales (fig. 363). Por consiguiente, á un punto luminoso único corresponde en realidad una serie de focos conjugados, dispuestos en línea recta, sobre el eje secundario del punto, siendo siempre más próximo al vértice el foco de los rayos periféricos. La distancia entre los focos extremos se llama *aberración longitudinal* de esfericidad.

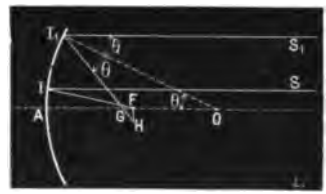


Fig. 363.

Cuando se trata de un punto luminoso situado en el eje principal á distancia infinita (fig. 363), la aberración correspondiente se llama *aberración principal*: es la distancia FG. Y si se coloca una pantalla en el plano focal, se tendrá, en vez de un punto luminoso único, un círculo luminoso de radio FH. De ahí resulta en las imágenes falta de claridad más ó menos grande, que hace poco conveniente el empleo de los espejos cóncavos esféricos de gran abertura; así es que se les ha reemplazado en la construcción de los instrumentos de óptica por los espejos cóncavos *parabólicos* (fig. 365).

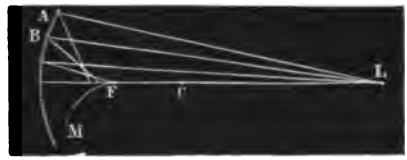


Fig. 364.

Como los rayos reflejados se cortan sucesivamente dos á dos (fig. 364), sus puntos de intersección forman en el espacio una superficie brillante que se llama *cáustica por reflexión*. La curva FM representa una de las ramas de la sección principal de esta superficie, que es *de revolución* en torno del eje principal.

374. **Espejos parabólicos.** — Los *espejos parabólicos* son espejos cóncavos cuya superficie es engendrada por la revolución de un arco de parábola AM alrededor de su eje AX (fig. 365).

Ahora bien, es una propiedad conocida de la parábola que en un punto cualquiera de esta curva *el rayo vector* FM y la recta ML, *paralela al eje, forman con la tangente* TT' *ángulos iguales.* Por consiguiente, los ángulos con la normal serán también iguales: luego, en estas clases de espejos todo rayo paralelo al eje, como LM, será reflejado según MF é irá á pasar *rigurosamente* por el foco geométrico F del espejo. *Recíprocamente*, si en este foco se encuentra un manantial de luz, los rayos luminosos que inciden sobre el espejo se reflejan en un haz *rigurosamente* paralelo al eje. Los espejos que poseen esta propiedad se llaman *aplanéticos.*

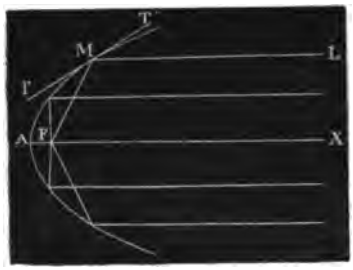


Fig. 365

375. **Construcción y uso de los espejos aplanéticos.** — En estas condiciones, la luz reflejada conserva la misma intensidad hasta gran distancia del foco; pues lo que debilita sobre todo la intensidad de los rayos es su divergencia. Por esto se prefieren los espejos parabólicos á los esféricos como *objetivos* de *telescopios*, no obstante la mayor dificultad de su construcción y su mayor coste. Actualmente se fabrican para este uso espejos de vidrio, plateado por el método Martin, que son al mismo tiempo menos pesados que los antiguos de bronce, más baratos, más fáciles de componer y susceptibles de pulimento más perfecto. Primero se les hace esféricos, y después se les vuelve aplanéticos trabajando sus diferentes regiones por el método de los *retoques locales*, debido á Foucault: á cada instante se sabe cuánto se dista en cada momento de la forma parabólica y en qué sentido, lo que suprime los tanteos y lentitud del antiguo método.

También se usan los espejos parabólicos como reflectores para las lámparas que se ponen en los coches públicos y trenes de camino de hierro. Estos reflectores sirvieron para los faros hasta que Fresnel ideó su *sistema refringente.*

CAPÍTULO IV

DIÓPTRICA.

LEYES DE LA REFRACCIÓN SIMPLE.

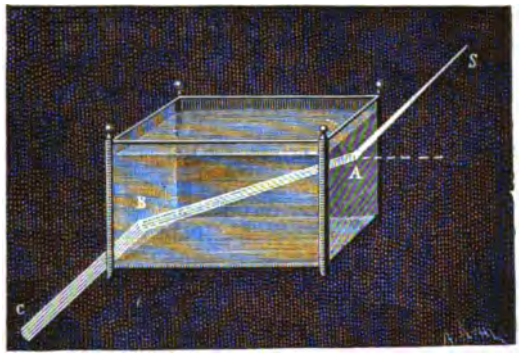
376. **Definiciones.** — La *refracción* en una desviación que experimentan los rayos luminosos cuando atraviesan *oblicuamente* la superficie de separación de dos medios transparentes, como el aire y el agua (fig. 366, I). Si los rayos inciden perpendicularmente á esta superficie, no experimentan ninguna desviación, y continúan propagándose en línea recta (fig. 366, II).

Sea SO un *rayo incidente* y AO la normal en O á la superficie de separación de los dos medios. Tomemos como plano de la figura 367 el de incidencia SOA: la superficie refringente está representada por la recta *mn*. Llámase *rayo refractado* á la dirección OH que toma la luz en el segundo medio; los ángulos SOA y HOB, que forman

estos rayos con la normal AB se llaman, uno *ángulo de incidencia* y el otro *ángulo de refracción.*

La luz que se presenta para pasar de un medio á otro no penetra

(I)



(II)

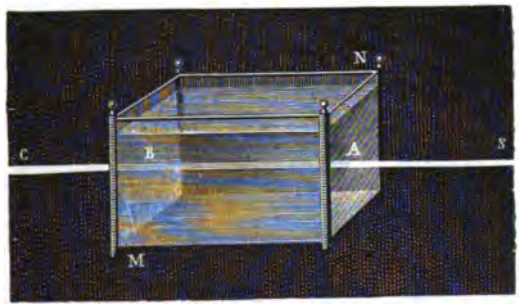


Fig. 366.

nunca totalmente en éste: una parte se refleja en la superficie de separación, otra se pierde difundiéndose y únicamente el resto penetra en el segundo medio. La refracción de un haz luminoso viene por consiguiente acompañada siempre de pérdida mayor ó menor de luz.

Fig. 367.

En los medios no cristalizados, como el aire, los líquidos, el vidrio ordinario, el rayo luminoso, *simple* en la incidencia, *sigue siéndolo* después de la refracción; pero en ciertos cuerpos cristalizados, como el espato de Islandia y varios cuarzos, el rayo incidente da origen á *dos radios refractados.* El primer fenómeno constituye la *refracción*

simple, el segundo la *doble refracción*. Los medios que sólo dan un rayo refractado se llaman *monorrefringentes;* los otros se denominan *birrefringentes*.

477. **Leyes de la refracción simple.** — La refracción simple se efectúa con arreglo á las dos leyes siguientes:

1°. *El rayo incidente y el refractado se encuentran en un mismo plano perpendicular á la superficie refringente.*

2°. (Ley de Descartes). — *Sea cual fuere la oblicuidad del rayo incidente, el seno del ángulo de incidencia y el seno del de refracción tienen una razón constante.*

Esta razón es el *índice de refracción* del segundo medio respecto del primero.

Las dos leyes mencionadas se demuestran principalmente por las consecuencias que de ellas se sacan; pero es posible probarlas de manera aproximada valiéndose de un antiguo aparato clásico, construído por Silbermann.

Aparato de Silbermann.—Consiste esencialmente en un círculo graduado, de cobre, dispuesto verticalmente sobre un trípode de tornillos de nivel (fig. 368) y provisto de dos reglas de cobre MF y OK. Éstas pueden moverse sobre la cara posterior del círculo, girando en torno de un vástago central, y recorren así libremente toda la graduación, que se marca á derecha é izquierda del punto I y va de 0° á 90°; en las reglas se colocan dos tubos semejantes al *c*, cuyos ejes, dirigidos rigorosamente hacia el centro, sirven de camino á los rayos luminosos, incidentes ó refractados. En una de las reglas hay un espejo M que se inclina á voluntad, y que permite enviar el rayo incidente en la dirección deseada; en la otra se dispone una pequeña pantalla de vidrio sin pulimentar *e*, donde se recibe el rayo refractado.

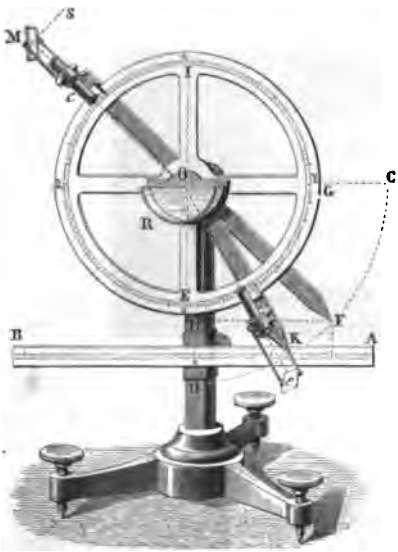


Fig. 368.

Para demostrar las leyes se empieza por fijar en el pie del aparato otra regla horizontal BA, dividida en milímetros, que se puede bajar ó subir á voluntad y que da longitudes proporcionales á los senos de los ángulos de incidencia y de refracción[1].

Después se coloca en el centro del círculo un vaso semicilíndrico de vidrio R, que se llena de agua (ó con cualquier otro líquido) hasta que la superficie libre coincida con el plano horizontal que con-

1. El mismo aparato puede servir para la demostración directa de las leyes de la reflexión. Basta con reemplazar el vaso de agua por un espejo plano, cuya superficie está dispuesta horizontalmente en el plano horizontal del centro. Entonces se suprime la regla graduada AB, que es inútil.

tiene el centro del círculo. Entonces se hace llegar un rayo luminoso SMO precisamente al centro del círculo graduado. Allí se refracta el rayo á su entrada en el agua, saliendo después, sin refractarse de nuevo, normalmente á la pared cilíndrica del vaso. Síguese dando vueltas á la regla K hasta que aparezca en el centro de la pantalla *e* una imagen luminosa. El ángulo KOE, que forma entonces la regla K con la normal IE trazada en el punto de incidencia, es el ángulo de refracción : el de incidencia es el ángulo MOI, igual á FOE, como opuesto por el vértice.

La primera ley se demuestra por la disposición misma del aparato. En efecto, el plano del nimbo que contiene los dos rayos luminosos es perpendicular á la superficie refringente. Ahora bien, si se supone que desde el punto O por centro y con el radio OK describimos el arco de círculo CD, el seno de incidencia es proporcional á la recta FH, trazada perpendicularmente á IE prolongada, y el seno de refracción á la perpendicular bajada desde la extremidad K sobre la prolongación de la misma recta IE. Estas dos magnitudes se calculan sucesivamente por medio de la regla AB. Su cociente es igual al $\frac{\text{sen}\, i}{\text{sen}\, r}$.

Moviendo la regla M se hace variar el ángulo de incidencia, y se observa que la razón entre sus senos *permanece constante.*

378. **Índice de refracción, índice inverso.** — Hemos dicho que este cociente constante es el *índice de refracción* del segundo medio respecto del primero. Sea n dicho índice, i y r los ángulos de incidencia y de refracción; se tiene $\frac{\text{sen}\, i}{\text{sen}\, r} = n$.

Cuando $n > 1$, el ángulo de incidencia es superior al de refracción; de ahí resulta que el rayo refractado se acerca á la normal: entonces se dice que el segundo medio es *más refringente* que el primero. En el caso de que se tuviera $n < 1$, el rayo refractado se apartaría de la normal: el segundo medio sería *menos refringente* que el primero [1].

Recíprocamente, si se consideran los medios en un orden inverso, es decir, si la luz se propaga del agua al aire ó del vidrio al aire, se observa por medio del aparato anterior, que los rayos siguen el mismo camino, pero en sentido contrario: KO pasa á ser el rayo incidente y OM es el refractado. En esto consiste lo que antiguamente se llamaba *principio del regreso inverso de los rayos luminosos.* De aquí resulta que si el índice de refracción directo fuera n, el *inverso* sería $\frac{1}{n}$.

379 **Fenómenos debidos á la refracción.** — Varios efectos naturales muy conocidos son efecto de la refracción simple. Vamos á citar algunos.

1°. *Elevación de los objetos sumergidos.* — Por efecto de la refracción, todos los cuerpos sumergidos en el agua ó en cualquier otro medio más refringente que el aire, parecen *aproximados* á la superficie de separación; por el contrario, parecerían *alejados*, si estuvieran sumergidos en un medio menos refringente.

Sea, por ejemplo, un objeto L sumergido en una masa de agua (fig. 369). Al pasar de este líquido al aire, los rayos LB, LA..., se apartan de la normal en el punto de incidencia y toman las direcciones AC, BD,... cuyas prolongaciones convergen sensiblemente en un punto L'. De manera que la vista que recibe estos rayos ve el objeto L subido hasta L'.

1. El índice varía con los medios : el del agua respecto del aire es $\frac{4}{3}$; el del crown-glass ordinario $\frac{3}{2}$.

Mientras más refractados están los rayos AC, BD..., más alto resulta el objeto Por esto se nos antojan subidos el fondo de un vaso ó el cauce de un río, y un palo que se introduce en el agua parece doblarse.

2ª. *Refracción atmosférica.* — Un efecto de refracción es también lo que nos hace ver los astros más altos sobre el horizonte de lo que realmente están. En efecto, las capas de la atmósfera aumentan en densidad al acercarse al suelo; pero como dado un mismo gas el índice de refracción aumenta con la densidad, resulta que al penetrar en

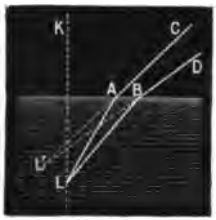


Fig. 369.

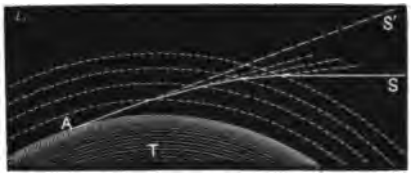


Fig. 370.

el aire los rayos del sol y al propagarse en él, se doblan (fig. 370), describiendo una curva que llega hasta la vista en A; de modo que vemos al astro en S' y no en S siguiendo la tangente á dicha curva.

El efecto es tanto más pronunciado cuanto más cerca del horizonte está el astro. En la Europa central, la refracción atmosférica eleva los astros algo más de medio grado (unos 34'). Como el Sol y la Luna tienen diámetros aparentes inferiores á 34', sus discos aparecen enteros — en el mar donde nada los oculta — aun antes de que su parte superior haya salido por encima del horizonte. De modo que el día se encuentra anticipado al amanecer, y prolongado al caer la tarde, por causa de este fenómeno.

380. **Ángulo límite. — Fenómeno de la reflexión total.** — Hemos visto que cuando un rayo luminoso pasa de un medio á otro menos refringente, por ejemplo del agua al aire, el ángulo de refracción es entonces mayor que el de incidencia. De ahí se sigue que cuando la luz se propaga en una masa de agua, de S á O (fig. 371) hay siempre un valor del ángulo de incidencia SOB para el cual el ángulo de refracción AOR se hace igual á un recto: entonces el rayo refractado OR se dirige según una incidencia rasante, esto es, paralelamente á la superficie del agua.

Fig. 371.

Este ángulo SOB se llama *ángulo límite*, porque con todo ángulo de incidencia mayor, tal como POB, el rayo incidente PO no puede dar origen á ningún rayo refractado: la experiencia prueba que entonces hay, en la dirección OQ *reflexión interior*. Llámasela *reflexión total* porque entonces la luz incidente es reflejada *en totalidad*.

Sea λ el ángulo límite, que está definido por la condición de que el ángulo de reflexión exterior r sea igual á 90° y de que, en consecuencia, sen $r = 1$. Por tanto, si en la fórmula $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{1}{n}$, se

hace sen $r = 1$, tendremos sen $\lambda = \frac{1}{n}$; luego $\lambda =$ arc sen $\frac{1}{n}$ [1].

Si se supone un punto luminoso O situado en un medio más refringente que el aire (fig. 372), el cono de rayos luminosos que tiene por ángulo en el vértice el doble del ángulo límite, divide al espacio en dos regiones: 1°. en lo interior del cono todos los rayos que inciden sobre la superficie de separación emergen en el aire, porque forman un ángulo de incidencia interno menor que λ; 2°. en lo exterior del cono, todos los rayos incidentes experimentan la reflexión total porque forman un ángulo de incidencia interno mayor que λ.

Fig. 372.

381. Espejismo. — Explicación de Monge. — El espejismo es una ilusión de óptica que hace ver la imagen invertida de los objetos lejanos. Este fenómeno se observa con frecuencia en los países cálidos y sobre todo en las llanuras arenosas

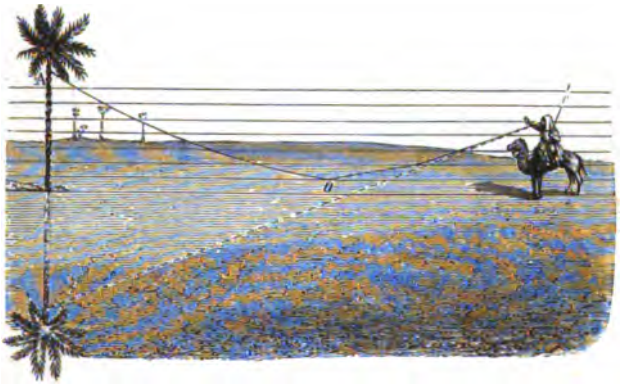


Fig. 373.

de Egipto: entonces el suelo presenta el aspecto de un lago tranquilo, donde se reflejan los árboles y aldeas inmediatas. Se conoce el espejismo desde la más remota antigüedad; pero el primero en explicarlo fue Monge.

Según éste, el espejismo es sencillamente un efecto de *reflexión total*. Las capas de aire se calientan en contacto de los arenales ardientes y van colocán-

1. Del agua el aire, el ángulo límite es 48°35'; del vidrio el aire es de 41°48'

dose por orden de densidades crecientes de abajo arriba. Un rayo luminoso que parte de un objeto elevado A (fig. 373) hacia el suelo, atraviesa capas cada vez menos densas y por consiguiente cada vez menos refringentes; el ángulo de incidencia crece, pues, de una capa á la inmediata y acaba por alcanzar el valor límite: entonces el rayo experimenta la reflexión interior, se eleva según indica la figura y se refracta siguiendo camino inverso y simétrico de la curva AO, pues ahora va pasando por capas cada vez más refringentes. Así es que la luz llega á la vista del observador en la misma dirección que si saliera de un punto situado debajo del suelo y simétrico de A (respecto de la capa en que se produce la reflexión): ve, por tanto, una imagen invertida del objeto que la emitió, como si lo reflejara en *o* un espejo.

Otro efecto de espejismo. — También ocurre que los navegantes observan en la atmósfera la imagen invertida de las costas ó de los navíos lejanos. Esto reconoce la misma causa que el fenómeno ya descrito, pero en sentido contrario, pues se produce cuando el mar está más frío que el aire. Entonces las más densas son las capas inferiores de la atmósfera, por razón de su contacto con la superficie de las aguas.

TRANSMISIÓN POR LOS MEDIOS REFRINGENTES.
LÁMINAS Y PRISMAS.

382. **Láminas de caras paralelas.** — *Ley.* — Cuando la luz atraviesa una lámina transparente de caras paralelas, *los rayos emergentes son paralelos á los incidentes.*

Demostración. — Sean un espejo de caras paralelas (fig. 374), que está representado en la figura por una sección perpendicular á sus caras, SA un rayo incidente, DB el emergente, i y r los ángulos de incidencia y de refracción á la entrada del rayo, y por fin r' é i' los mismos ángulos á su salida.

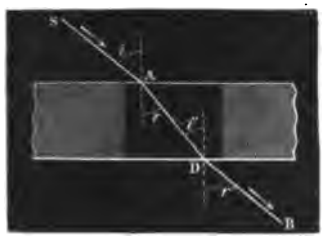


Fig. 374.

La luz experimenta en A una primera refracción, determinada por la ecuación $\frac{\text{sen}\, i}{\text{sen}\, r} = n$ (siendo n el índice del vidrio respecto del aire). En D se refracta por segunda vez y la ecuación es entonces $\frac{\text{sen}\, r'}{\text{sen}\, i'} = n'$ (siendo n' el índice del aire respecto del vidrio). Pero ya se ha visto (378) que estos dos índices son inversos uno de otro, quiere decir que $n' = \frac{1}{n}$; luego se tiene $\frac{\text{sen}\, r'}{\text{sen}\, i'} = \frac{\text{sen}\, r}{\text{sen}\, i}$.

Pero como las dos normales en A y B son paralelas, los ángulos r y r' son iguales por alternos-internos. Siendo iguales los numeradores de los dos cocientes antedichos, ocurre lo mismo con los denominadores: de donde se deduce que los ángulos i' é i (inferiores uno á otro en 90°) son iguales, y por tanto que DB es paralelo á SA.

Demostración. — 1°. Si el rayo luminoso incide normalmente á

una cara, sale de la lámina en la prolongación misma de su dirección de incidencia. Si cae oblicuamente, sufre al atravesar la lá-

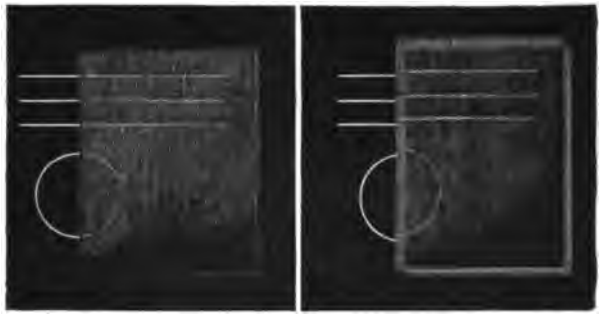


Fig. 375.

mina, no una desviación sino un movimiento lateral que sería fácil calcular, y que es más ó menos grande, según el ángulo de incidencia y el grueso de la lámina.

Colocando una lámina de vidrio encima de una hoja de papel donde se han trazado líneas rectas ó curvas (fig. 375), y mirando oblicuamente á través de ella, se observa en las líneas una solución de continuidad que no se nota mirando normalmente.

383. **Medida de los índices de refracción. — Método del Duque de Chaulnes.** — También resulta que si se mira un punto luminoso S bajo una incidencia poco oblicua (fig. 376), á través de una lámina de caras paralelas de índice n y de grueso e, se ve una imagen S' aproximada á la vista. Si se calcula este cambio de lugar vertical aparente d sobre la normal SS', se ve que es casi igual á $\frac{n-1}{n}e$.[1]

El Duque de Chaulnes utilizó este fenómeno para medir el índice de refracción de una sustancia que se puede cortar ó trabajar en láminas de caras paralelas[2].

1. En efecto, tracemos IK, paralela é igual á d. En el triángulo KII', se tiene

$$\frac{d}{\operatorname{sen}(i-r)} = \frac{\mathrm{II'}}{\operatorname{sen} i},$$

y en el triángulo HII', se tiene $\mathrm{II'} = \frac{e}{\cos r}$; de donde sustituyendo,

$$d = \frac{\operatorname{sen}(i-r)}{\operatorname{sen} i \cos r} = e\,\frac{\operatorname{sen} i \cos r - \operatorname{sen} r \cos i}{\operatorname{sen} i \cos r} = e\left(1 - \frac{1}{n}\frac{\cos i}{\cos r}\right).$$

Para los rayos como SI, muy próximos á la normal, puede considerarse que el cociente $\frac{\cos i}{\cos r}$ es igual á la unidad. Entonces queda

$$d = e\,\frac{n-1}{n}.$$

2. Véase Chappuis y Berget, *Leçons de physique générale*, tomo III.

Trázase un rasgo con un diamante en una lámina plana de vidrio ordinario, y se mira este rasgo por medio de un microscopio provisto de un tornillo de afocamiento micrométrico. Si entonces se pone sobre el vidrio la lámina de índice no conocido, el afocamiento queda desarreglado en todo lo que se ha movido la imagen del trazo. Para volver á poner las cosas en su punto, hay que subir el cuerpo del microscopio esa distancia *d* que se mide valiéndose del tornillo.

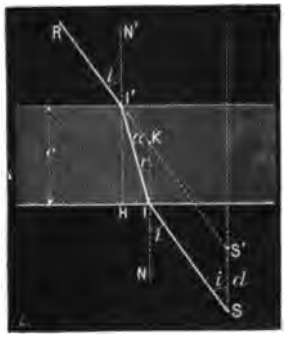


Fig. 376.

Falta por averiguar el grueso *e* de la lámina. Podría medírsele con el esferómetro; pero basta afocar con el microscopio sucesivamente sobre la cara superior y la inferior de la lámina. El primer afocamiento se efectúa mirando, por ejemplo, un polvillo que haya en la cara superior; el segundo, suprimiendo la lámina y mirando de nuevo el trazo ó marca hecha en la placa de vidrio. La longitud que se ha movido el microscopio para obtener estos dos afocamientos es igual á *e*.

384. **Prismas.** — 1°. *Definiciones.* — Llámase *prisma* en óptica á todo medio transparente limitado por dos caras planas inclinadas sobre otra.

La intersección de estas dos caras es una línea recta que se llama la *arista* del prisma, y el ángulo diedro que comprenden es su *ángulo refringente*; toda sección perpendicular á la arista es una *sección principal*. Los prismas que se emplean para las experiencias tienen

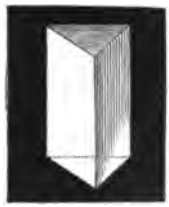


Fig. 377.

Fig. 378.

la forma geométrica de prismas rectangulares rectos (fig. 377), y su sección principal es un triángulo (fig. 378). En esta sección, el punto A toma el nombre de *vértice* del prisma, la recta CB es su *base* y el ángulo plano CAB es su *ángulo refringente*.

2°. *Refracción en la sección principal.* — Cuando un rayo luminoso incide en una sección principal, permanece necesariamente allí refractándose.

Sea OD un rayo incidente; refráctase en D, acercándose á la normal, puesto que entra en un medio más refringente, y toma una dirección DK, determinada por la ecuación $\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = n$. El rayo sufre en K una nueva refracción, se aparta de la normal y toma una di-

rección KH, dada por la igualdad $\frac{\text{sen } i'}{\text{sen } r'} = n$, llamando r' al ángulo de incidencia interior é i' el de emergencia.

Obsérvase que estas dos refracciones sucesivas desvían la luz en el mismo sentido, de modo que *el rayo emergente* KH *sale inclinado hacia la base del prisma.*

Además, si se reciben en la vista los rayos emergentes, se ve necesariamente en O' el punto luminoso, en su dirección prolongada : luego, *los objetos vistos á través de un prisma parecen levantados en dirección de su vértice.*

Por fin, esta imagen O' es virtual, puesto que está formada por las prolongaciones de los rayos : llámasela el *foco virtual* del prisma. De manera que éstos suministran imágenes virtuales de los objetos luminosos mirados á través de su masa.

3°. *Ángulo de desviación.* — La desviación que el prisma imprime á la luz se mide por el ángulo OEO' que forma el rayo emergente DO con la dirección del rayo incidente (fig. 378) : este es el *ángulo de desviación.*

Este ángulo aumenta con el índice de refracción y con el ángulo refringente del prisma; también varía con el ángulo de incidencia del rayo que cae sobre el prisma : es una función de estas tres variables.

Puédese demostrar este aserto, ya por el cálculo, mediante ecuaciones llamadas *fórmulas del prisma*, ya por experimentos directos.

385. **Fórmulas del prisma.** — Sea AMN' la sección principal de un prisma (fig. 379), SI el rayo incidente, II'R la marcha del rayo á través del prisma, IN é I'N' las normales en el punto de incidencia y el de emergencia, A' su punto de encuentro. Sea d el ángulo de desviación ROS' que se trata de calcular. Tiénese primeramente :

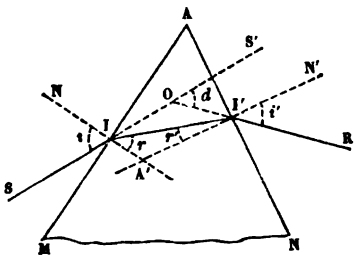


Fig. 379.

[1] $\quad \text{sen } i = n \text{ sen } r,$

[2] $\quad \text{sen } i' = n \text{ sen } r'.$

Además, el ángulo interior A' de las dos normales puede considerarse como perteneciente, ya al triángulo A'II', ya al cuadrilátero A'IAI'. En el triángulo, es suplementario de los ángulos en la base r y r' lo que da

$$A' = 180° - (r + r').$$

En el cuadrilátero, que es *inscriptible* (puesto que los ángulos opuestos I é I' son rectos), A' es suplementario del ángulo A, lo que da

$$A' = 180° - A.$$

Comparando estas dos igualdades, se deduce

[3] $$r + r' = A.$$

En fin, por ser el ángulo d exterior al triángulo OII', es igual á la suma de los ángulos en la base, II'O é I'IO. Pero se comprende fácilmente que II'O $= i' - r'$ y que I'IO $= i - r$. Tiénese pues

$$d = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r'),$$

de donde

$$d = i + i' - A. \qquad [4]$$

Estas cuatro ecuaciones constituyen las *fórmulas del prisma*. En ellas entran, á más de la incógnita d, las seis variables A, n, i, i', r, r'; pero se concibe que sea posible expresar tres de ellas, por ejemplo i', r y r', en función de las otras tres, por medio de las tres primeras ecuaciones. Llevando estos valores á la ecuación [4], ésta no contendría ya más que d, i, A y n. Puede en consecuencia considerarse á d como una función de esas tres variables.

386. **Estudio experimental de la desviación.** — 1°. d *crece con* n. — *Poliprisma.* — Llámase *poliprisma* á un prisma formado de varios prismas del mismo ángulo, unidos por sus secciones principales (fig. 380); son de sustancias desigualmente refringentes, por ejemplo

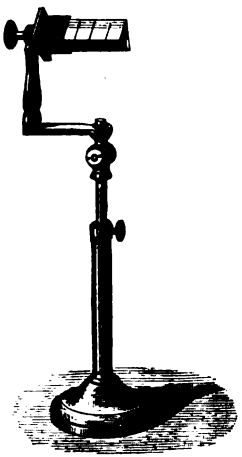


Fig. 380.

Fig. 381.

de vidrio, de flint, de cristal de roca, de crown. Ahora bien, si se mira una línea recta á través del poliprisma, se ven sus diferentes partes á alturas desiguales. La porción más *elevada* es la que se ve á través del flint, cuyo índice de refracción es muy grande; después viene la que se observa á través del cristal de roca, y así sucesi-

vamente en el orden de los índices de refracción decrecientes.

2°. d *crece con* A. — *Prisma de ángulo variable.* — Llámase así un prisma constituído por dos espejos *m* y *n* móviles alrededor de charnelas, y que pueden deslizarse con frotamiento duro entre dos placas de cobre paralelas B y C, fijas en un montante (fig. 381). De modo que forman con estas placas una especie de vaso perfectamente cerrado. Echando en él agua, ó cualquier otro líquido transparente, é inclinando más ó menos los espejos, se obtiene un prisma de ángulo variable.

Si se recibe en una de sus caras un rayo luminoso S, inclinando la otra cada vez más, el ángulo del prisma crece y se ve que va aumentando la desviación del rayo emergente E.

3°. d *varía con* i. — *Desviación mínima.* — Cuando se recibe un haz de luz *monocromática* á través de una hendidura vertical (fig. 382), va á proyectar un rastro luminoso sobre una pantalla lejana. Pero si se interpone un prisma vertical entre la abertura y la pantalla, el haz se desvía hacia la base del prisma yendo á proyectarse en D : la distancia CD es proporcional al ángulo de desviación. Ahora bien,

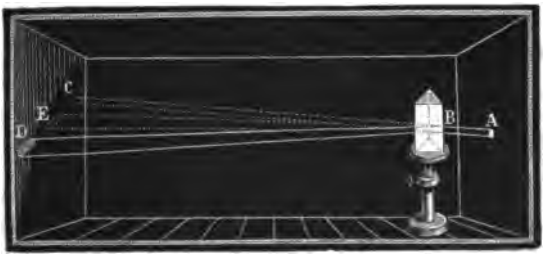


Fig. 382.

si entonces se da vueltas al montante del prisma de modo que disminuya gradualmente el ángulo de incidencia, se ve que el haz D va acercándose gradualmente al punto C, lo cual prueba que la desviación decrece al mismo tiempo que el ángulo *i*. Pero si á partir de cierta posición E del haz, se continúa disminuyendo *i*, se ve al haz volver sobre sí mismo hacia el punto D : esto prueba que la desviación *aumenta*, después de haber *disminuído*, por más que siempre se dé vuelta al prisma en el mismo sentido.

La desviación *d* es por tanto una función de *i*, que pasa por un mínimo para un valor dado de la variable. El valor correspondiente de la función es lo que se llama *desviación mínima.*

387. **Condición experimental de la desviación mínima.** — Es posible determinar, ya por la experiencia, ya por el cálculo, el valor de *i* que corresponde á la desviación mínima.

1°. *Experiencia.* — La experiencia prueba que en el momento de

alcanzarse la posición del mínimum de desviación, la parte interior del rayo refractado está igualmente inclinada sobre las dos caras del prisma. De aquí se deduce que los dos ángulos de refracción r y r' son iguales. Ahora bien, si se lleva esta condición $r = r'$ á la ecuación [3], la convertimos en

$$2\,r_m = A, \quad \text{de donde} \quad r_m = \frac{A}{2}.$$

Conociendo el ángulo r_m, se tendrá la incidencia i_m correspondiente al mínimo, por la ecuación [1]:

$$[5] \qquad \operatorname{sen} i_m = n \operatorname{sen} \frac{A}{2}.$$

2°. *Cálculo.* — Se llega á la misma condición averiguando por medio del álgebra cual es el valor de i con el cual pasa por un mínimo la función d.

Añadamos los valores de sen i y de sen i', dados por las ecuaciones [1] y [2], y reemplacemos la suma de los senos por los productos equivalentes; resulta

$$\operatorname{sen} \frac{i+i'}{2} \cos \frac{i-i'}{2} = n \operatorname{sen} \frac{r+r'}{2} \cos \frac{r-r'}{2}.$$

Ahora bien, según la ecuación [4] se tiene $i + i' = A + d$, y con arreglo á la 3], $r + r' = A$. La igualdad precedente se convierte, pues, en

$$\operatorname{sen} \frac{A+d}{2} = n \operatorname{sen} \frac{A}{2} \frac{\cos \frac{r-r'}{2}}{\cos \frac{i-i'}{2}}.$$

Pero el aumento $(r - r')$ del ángulo de refracción es siempre inferior al $(i - i')$ del de incidencia correspondiente [1]. De aquí se deduce, por consiguiente, que el cociente de los cosenos es siempre mayor que la unidad. Alcanzará, pues, su mínimum cuando sea igual á *un*, lo que no puede ocurrir sino en tanto que $r = r'$ é $i = i'$. Tal es la condición del mínimo[1].

Valor de la desviación mínima. — Sea δ este valor: es fácil deducirlo del del ángulo i_m ó del ángulo r_m. En efecto, si en la ecuación [4] se hace $i = i' = i_m$, resulta

$$[6] \qquad \delta = 2\,i_m - A,$$

estando i_m definido por la ecuación [5].

388. **Condición de emergencia en los prismas.** — En cuanto precede hemos supuesto que el rayo que penetraba en el prisma por I salía de él por I'. Ahora bien, la emergencia no siempre se efectúa, porque el rayo debe pasar de un medio más refringente á otro que lo es menos. Se demuestra que *los rayos luminosos refractados por la primera cara de un prisma no pueden salir á través de la segunda sino*

1. Basta con observar que el aumento de sen i es igual á n veces el aumento de sen r siendo $n > 1$), y que los ángulos i y r, más pequeños que 90°, crecen como sus senos.

en tanto cuanto el ángulo refringente del prisma es menor que el doble del ángulo límite de la sustancia del prisma.

En efecto, sean AMM' la sección principal del prisma (fig. 383) y SI un rayo cualquiera. Todos los que inciden en I pueden penetrar evidentemente en el prisma, sea cual fuere su ángulo de incidencia, desde 0° hasta 90°. Allí quedan comprendidos en un ángulo igual á 2 λ (siendo λ el ángulo límite) y que tiene como bisectriz la normal IN á la cara de incidencia. Esta porción del plano es el *lugar geométrico* de todos los rayos que pueden penetrar por el punto I en la sección principal del prisma; SH' es uno de estos rayos, que forma en I' un ángulo de incidencia interior *r'* y no puede emerger más que en el caso de que *r'* tenga un valor inferior ó todo lo más igual á λ.

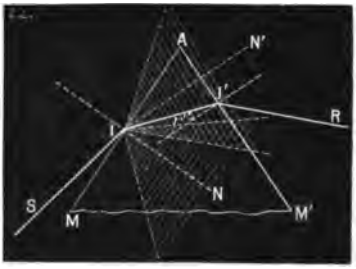


Fig. 383.

Tracemos desde el punto I una perpendicular IN' á la cara de emergencia; siendo el ángulo I'IN' igual á *r'*, todo rayo emergente debe formar con esta normal un ángulo < λ ó = λ; luego, *todos los rayos que emergen* están comprendidos en un segundo ángulo, igual al precedente, y que tiene como bisectriz IN' (lo sombreamos con líneas perpendiculares á IN').

El *lugar* de los rayos que emergen entre los que han penetrado, es pues *la parte del plano común á estos dos ángulos.*

De esta construcción geométrica se puede deducir en qué condiciones puede servir para la refracción un prisma de abertura dada. Para que haya un haz emergente, precisa que estos dos ángulos se corten; ahora bien, la condición de intersección es evidentemente que las bisectrices IN é IN' formen entre ellas un ángulo N'IN < 2 λ, ó todo lo más = 2 λ; pero el ángulo N'IN es precisamente igual al ángulo A: la condición de intersección es pues A < 2 λ ó = 2 λ. Si A = 2λ, el haz emergente se reducirá á los rayos que han penetrado en el prisma rozando la superficie de incidencia. Si A es < 2 λ, el haz emergente será tanto más grueso cuanto más pequeño sea el ángulo A.

389. **Prismas de reflexión total.**— Se ha visto que un prisma de índice determinado no puede servir para la refracción más que en tanto cuanto su ángulo refringente es menor que 2 λ ó todo lo más igual á 2 λ. Si se tiene A > 2 λ, ningún rayo incidente emergirá; todo rayo que penetre en el prisma *se reflejará totalmente* en la cara de emergencia en vez de atravesarla: entonces se tendrá un *prisma de reflexión total.*

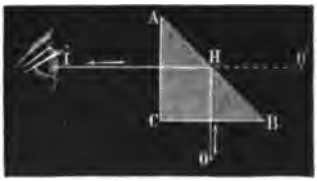


Fig. 384.

La abertura de semejante prisma depende de su índice de refracción, puesto que sen λ es igual á la inversa del índice *n*. Mientras más refringente sea la substancia, más pequeña será la abertura límite del prisma de reflexión total. Para el vidrio ordinario, el índice es $\frac{3}{2}$ y el ángulo límite 41°48′: bastaría pues con dar al prisma una abertura de 84° para que reflejara totalmente todos los rayos inci-

dentes. *A fortiori*, los prismas rectangulares (fig. 384), cuya sección es un triángulo rectángulo isósceles, serán *de reflexión total.*

Y, en efecto, el rayo OH, perpendicular á la cara BC, entra en el vidrio sin refracción y va á formar con la cara AB un ángulo igual á 45°, mayor que el ángulo límite del vidrio. El rayo OH sufre por tanto en H la reflexión total, que le imprime una dirección HI perpendicular á la segunda cara AC. De manera que la cara mayor del prisma produce aquí el efecto del espejo plano más perfecto, y la vista situada en I ve en O' la imagen simétrica del punto O.

390. **Focos de un prisma.** — Cuando un haz luminoso comprendido entre dos rayos de incidencia i é $i + di$, penetra en un medio más refringente A, toma la dirección

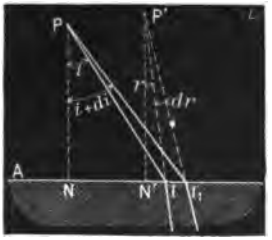


Fig. 385.

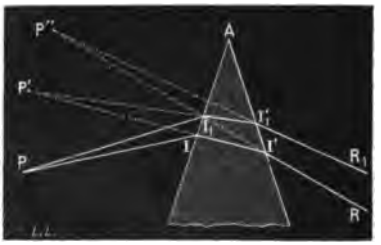


Fig. 386.

$P'II_1$ (fig. 385) y las prolongaciones de los rayos refractados van á cortarse en un punto P', que es el foco (virtual) del punto P. Si se llama p á la distancia PI y p' á la distancia P'I, se demuestra que hay entre ellas la relación

$$[1] \qquad p' = pn \frac{\cos^2 r}{\cos^2 i}.$$

En el caso de un prisma (fig. 386), hay dos refracciones sucesivas sobre las dos caras, y por consiguiente dos focos virtuales P' y P''. Las distancias á las caras correspondientes del prisma, contadas en los rayos incidentes, son p y p' para la primera cara, p'_1 y p''_1 para la segunda. La relación entre p' y p está dada por la ecuación [1]. La relación entre p'_1 y p''_1 estará dada por una ecuación análoga,

$$[2] \qquad p''_1 = p'_1 \frac{1}{n} \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 r'}.$$

Cuando el trayecto de la luz en el prisma es despreciable comparado con la distancia del punto luminoso, se pueden considerar las distancias p' y p'_1, p'' y p''_1, como iguales entre sí, y entonces la ecuación [2] puede escribirse

$$[2\ bis] \qquad p'' = p' \frac{1}{n} \frac{\cos^2 i'}{\cos^2 r'}.$$

Multiplicando miembro á miembro las ecuaciones [1] y (2 *bis*), resulta

$$p'' = p \frac{\cos^2 r \cos^2 i'}{\cos^2 i \cos^2 r'}.$$

Si se hacen incidir los rayos muy cerca del vértice A, se puede considerar á p'' y p como las distancias del punto y de su foco al vértice.

Consecuencias. — 1°. Si el prisma está orientado en la posición del mínimo se tiene $p'' = p$, pues $i' = i$ y $r' = r$.

Luego el foco virtual se encuentra á la misma distancia del vértice del prisma que el punto luminoso.

2°. Como esta distancia es independiente de n, si la luz emitida por P es compuesta, todos los focos virtuales correspondientes á las diversas radiaciones estarán distribuídos en una circunferencia que tiene á P por centro y á p por radio.

De consiguiente, si se recibe el haz en un anteojo afocado para uno de los puntos, lo estará también para todos los demás. Esta consecuencia es el principio mismo del espectroscopio (424).

391. **Medida de los índices.** — Newton dedujo de la desviación mínima un método general para medir los índices de refracción de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos. Consiste en aplicar la fórmula de la desviación mínima. Tiénese, por una parte

$$im = \frac{A + \delta}{2} \quad \text{y} \quad n = \frac{\operatorname{sen} im}{\operatorname{sen} \frac{A}{2}},$$

de donde se deduce

$$n = \frac{\operatorname{sen} \frac{A + \delta}{2}}{\operatorname{sen} \frac{A}{2}}.$$

Basta con determinar directamente A y δ.

Estas dos medidas se efectuán con un mismo instrumento, el *goniómetro* [1]. Como modelo más sencillo puede citarse el de Babinet.

Compónese esencialmente de un círculo graduado (fig. 387 y 388), que se puede poner horizontal por medio de tornillos de nivel, y en el cual se mueve un anteojo. En éste hay un retículo, uno de cuyos hilos es vertical; se comprueba que esta condición se ha satisfecho dirigiendo la visual á una mira vertical lejana, como por ejemplo una aguja de pararrayo. El prisma A, que debe servir para las me-

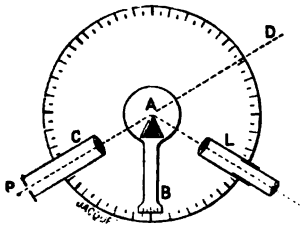


Fig. 387.

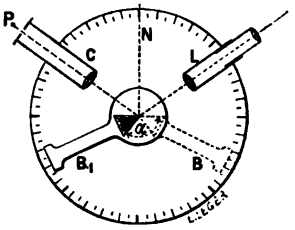


Fig. 388.

didas, la fija á la cera blanda en una plataforma provista de tres tornillos de nivel, lo cual permite poner vertical la arista refringente del prisma. Además, esta plataforma puede dar vueltas alrededor del centro del círculo, gracias á una regla móvil que permite medir los movimientos angulares en el nimbo graduado. Por fin, un colimador C (424, II, 2°) permite hacer incidir sobre el prisma un haz de rayos paralelos.

Medida de δ. — Se empieza por poner el prisma casi en la posición del mínimum; entonces se dirige el anteojo sobre la hendidura luminosa P del colimador, y así se acaba la determinación rigurosa de la posición del mínimum.

Es posible arreglarse de manera que el haz incidente pase tocando la arista refringente A (fig. 387), y se divide allí en dos: uno que sigue su camino rectilíneo según AD, el otro que experimenta la refracción según AL. Basta con mirar

1. De γονία, ángulo, y μέτρον, medida.

sucesivamente en ambas direcciones : la distancia angular de las dos posiciones sucesivas del anteojo, contada en el nimbo graduado, expresa el ángulo δ.

Medida de A. — Se hace llegar muy cerca del vértice del prisma el haz paralelo procedente del colimador, que se refleja en una de las caras (fig. 388), y se mira en el anteojo el haz reflejado. Después, dejando donde están el haz incidente y el anteojo, se hace dar vuelta al prisma un ángulo tal que la última cara vaya á colocarse en la prolongación de la posición precedente de la primera : como entonces este segundo espejo coincide con el primero, se encuentra de nuevo en el anteojo el haz reflejado. El ángulo α que se ha hecho girar al prisma es igual á 180° — A. Se le mide de manera directa por el movimiento de la regla [1].

Este método se debe á Wóllaston ; es el que usan los mineralogistas para medir los ángulos diedros de los cristales. Lo hemos citado precedentemente (360) como aplicación de los espejos planos.

1°. *Caso de los líquidos.* — Biot aplicó el mismo método á los líquidos. Tómanse prismas huecos que se llenan del líquido con que se experimenta y que se cierran por medio de espejos de caras paralelas.

Cuando estos espejos no son absolutamente perfectos, el método deja que desear. Macé de Lépinay ha indicado un método de corrección para este género de error [2].

2°. *Caso de los gases.* — Biot y Arago usaron el mismo método, valiéndose de un prisma hueco formado por un tubo de vidrio de paredes gruesas y resistentes AB (fig. 389), cuyos dos extremos, cortados en bisel, estaban cerrados por dos espejos de caras paralelas inclinados 145° : era el *ángulo refringente* del prisma. La cavidad de éste comunicaba con el exterior por medio de un conducto de llave terminado en un paso de tornillo. De esta manera se podía hacer el vacío á voluntad é introducir en el prisma el gas que se quería estudiar, después de purificarlo y secarlo. La cavidad interior comunicaba igualmente con una campana de vidrio H, atornillada en la prolongación superior del conducto. Esta campana contenía un barómetro de sifón que indicaba exactamente en cada experimento la presión del gas interior.

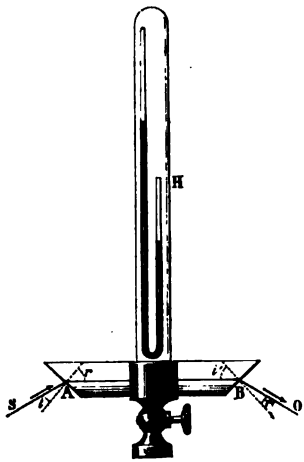


Fig. 389.

Resultados. — Así obtenían el índice de los gases, tomado á temperatura y presión determinadas, respecto del aire atmosférico Así descubrieron que este coeficiente *no es constante para un mismo gas*, porque no sólo depende de la temperatura y de la presión de éste, sino también de las del aire ambiente.

Así es que trataron de determinar para cada gas su *índice de refracción absoluto* (quiere decir el índice referido al vacío) en las condiciones normales de temperatura y de presión. Llamando n al índice *relativo* así determinado, y n_0 y n'_0 á los índices *absolutos* del gas interior y de la atmósfera ambiente, se tenía sin duda

$$n = \frac{n_0}{n'_0}.$$

Llegaron á determinar n_0 para el aire y los gases, combinando la medida directa de n con una ley empírica que expresaban por la ecuación

$$\frac{n_0^2 - 1}{d} = \text{constante}$$

1. Véase Chappuis y Berget, *Leçons de physique générale*, tomo III.

2. Macé de Lépinay, *Mesure des indices de réfraction des liquides* (*Journal de physique* 1ª. serie, t. IX).

(d densidad del medio de índice absoluto n_0) y que enunciaban como sigue : *el poder refringente de los gases es constante.*

Esta ley resultó probada por sus experimentos, y después por los de Dulong y de Jamin.

Ley de Gladstone. — Gladstone y Dales han aplicado á todas las sustancias transparentes una ley análoga, hallando

$$\frac{n-1}{d} = \text{constante}.$$

Esta fijeza es característica de cada sustancia.

TRANSMISIÓN POR LOS MEDIOS REFRINGENTES. — LENTES.

392. **Definiciones.** — Se llama *lentes* á unos medios transparentes limitados por superficies curvas de revolución. Según que las meridianas de las superficies terminales son líneas rectas ó círculos, así reciben estos aparatos el calificativo de *cilíndricos* ó de *esféricos*.

Se hacen generalmente de *crown-glass*, vidrio que contiene escasa cantidad de plomo, ó de *flint-glass*, que contiene mucho y es más refringente que el primero.

Lentes convergentes y divergentes. — Combinando superficies esféricas, ya entre sí, ya con superficies planas, se obtienen seis especies de lentes (fig. 390, sección); cuatro de ellas están formadas por dos superficies esféricas, y dos por una plana y otra esférica. La primera, A, se llama *biconvexa;* la segunda, B, *plano-convexa;* la tercera, C, *cóncavo-convexa;* la cuarta, D, *bicóncava;* la quinta, E, *plano-cóncava;* y la última, F, *convexo-cóncava.* La lente C se denomina también *menisco convergente* y la F *menisco divergente.*

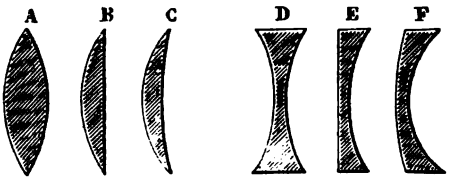


Fig. 390.

Las tres primeras, más gruesas en el centro que en los bordes, son *convergentes;* las últimas, más delgadas en el centro, son *divergentes.*

Eje principal. — En las lentes de superficies esféricas, los centros de estas esferas se llaman *centros de curvatura* y la recta trazada por los dos centros es el *eje principal* (fig. 391). En una lente plano-cóncava ó plano-convexa, el eje principal es la perpendicular bajada del centro de la cara esférica á la cara plana.

Sección principal. — Llámase *sección principal* de una lente á toda sección practicada por un plano que pasa por el eje principal.

393. **Analogía física de una lente y de un prisma.** — La refracción de la luz en las lentes puede compararse con la de los prismas, suponiéndolos limitados por una *infinidad* de elementos planos *infinitamente pequeños.* La *normal* en un punto cualquiera es entonces la perpendicular al plano tangente que contiene el elemento corres-

pondiente. Es posible concebir en los puntos conjugados, de incidencia y de emergencia, I é I', dos superficies planas más ó menos inclinadas entre sí, que produzcan el efecto de un prisma de ángulo A (fig. 391). Y entonces cada una de las lentes A, B, C (fig. 390) puede ser comparada con un conjunto de prismas que tienen sus bases reunidas y vueltas hacia el eje principal OO', y las D, E, F á otra serie de prismas vueltos en sentido contrario. Esto explica porqué las primeras tienen como efecto hacer *converger* los rayos hacia el eje y las últimas hacerlos *divergir*. Así es que todas las lentes convexas son *convergentes* y todas las cóncavas *divergentes*.

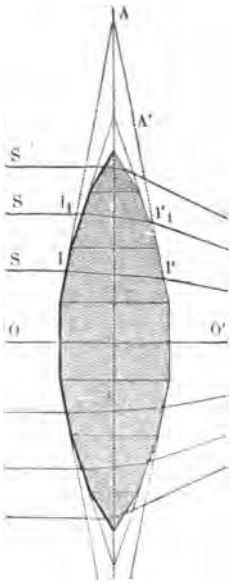


Fig. 391.

394. **Lentes delgadas convergentes : estudio geométrico y experimental.** — La teoría de las lentes esféricas (convergentes ó divergentes) puede obtenerse, como la de los espejos esféricos, con cierta aproximación que basta en muchos casos, con tal de admitir previamente las hipótesis que siguen :

1°. Las lentes son *delgadas*, quiere decir que su grueso es despreciable y no interviene en la construcción de los rayos refractados.

2°. Tienen *pequeña abertura* (10 á 12 grados), ó por lo menos sólo admiten *rayos centrales*, esto es, *poco alejados* del eje geométrico, *paralelos* á este eje ó *escasamente inclinados* sobre su dirección.

3°. El objeto luminoso se supone *colocado simétricamente* respecto del eje principal, de modo que todos los fenómenos lumínicos son también *simétricos* con relación á este eje. De consiguiente se harán las construcciones en el plano de la sección principal que contiene el punto ó el centro del objeto luminosos. Y esas construcciones se simplificarán por el hecho de que la lente delgada podrá ser representada por una sencilla línea recta, ó bien de que podrán no tenerse en cuenta sino los rayos incidentes en el borde de la lente, en la región desprovista de grueso.

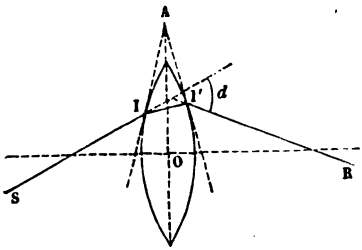


Fig. 392.

Explicación de la convergencia. — Todo rayo SII'R que atraviesa una lente convergente, se encuentra en el mismo caso que si atravesara un prisma A, de igual sustancia, que tenga por caras los planos tangentes en I y en I' (fig. 392). Este prisma es siempre de *pequeña abertura*. La desviación *d* es precisamente igual

á la que produce el prisma y se deriva de las fórmulas del mismo, que resultan muy simplificadas cuando se introduce en ellas la hipótesis de los ángulos pequeños, que consiste en hacer ahí $i = \text{sen } i$, $\text{sen } i' - i'$, etc. Así se convierten en

[1] $$i = nr,$$
[2] $$i' = nr',$$
[3] $$A = r + r',$$
[4] $$d = (n - 1) A.$$

Llamando A al ángulo del prisma de pequeña abertura que se puede sustituir á la lente, se tiene por desviación de un rayo luminoso tal como SII'R.

[5] $$d = (n - 1) A.$$

395. **Focos : Definiciones y determinación.** — Se llama *focos* á los puntos donde van á reunirse los rayos refractados ó sus prolongaciones.

1°. *Foco principal.* — Cuando un haz luminoso L B M N incide sobre la lente paralelamente á su eje principal (fig. 393), la *experiencia prueba* que *todos los rayos van visiblemente á reunirse*, después de su refracción, en *un punto único* F.

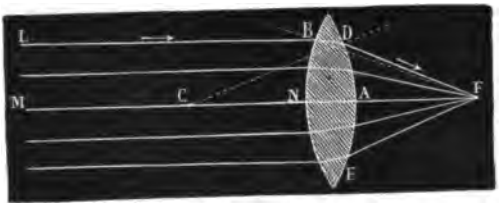


Fig. 393.

Este punto es el *foco principal* y la distancia AF es la *distancia focal principal*, constante para una misma lente, pero que varía con el radio de curvatura y el índice de refracción.

Recíprocamente, si el punto luminoso está en el foco principal, el haz divergente FDE que envía sobre la lente, sale de ella paralelo al eje principal.

Cálculo de la distancia focal principal. — Ecuación del poder convergente. — Sea SA uno de los rayos paralelos al eje principal (fig. 394); este rayo es refractado según AF, después de experimentar la desviación d, obtenida por la fórmula [5]. Calculemos d y A en función de los elementos de la lente.

El ángulo d es igual al ángulo AFO del triángulo AOF (ángulos alternos internos); es pues posible tomar tang AFO como medida de d (hipótesis de los ángulos pequeños), y escribir

$$d = \text{tang AFO} = \frac{AO}{OF}.$$

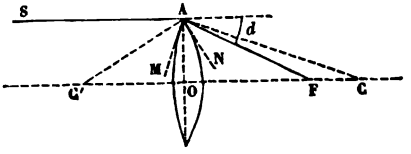


Fig. 394.

Por otra parte, el ángulo A es igual á la suma de los ángulos MAO y NAO; pero MAO = ACO y NAO = AC'O (lados perpendiculares).

Tomando como medida de estos ángulos sus tangentes trigonométricas, resulta

$$A = \text{tang ACO} + \text{tang AC'O} = \frac{AO}{CO} + \frac{AO}{C'O}.$$

Sustituyendo en la ecuación [1] y dividiendo por AO, pasa á ser

$$\frac{1}{FO} = (n-1)\left(\frac{1}{CO} + \frac{1}{C'O}\right) \quad \text{ó bien} \quad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right). \quad [1]$$

Se ve que la distancia f es independiente del rayo elegido: esto prueba la existencia del foco principal; la inversa de esta distancia, es decir $\frac{1}{f}$, se llama el *poder convergente*, y á su vez la ecuación se denomina *ecuación del poder convergente.*

2°. *Focos conjugados.* — Sea un punto luminoso P, situado en el eje, más allá del foco principal y bastante cercano para que los rayos que envía sobre la lente sean divergentes (fig. 395). La *experiencia prueba* que todos los rayos que parten del punto P van á reunirse visiblemente en P′: este punto es el *foco conjugado* de P.

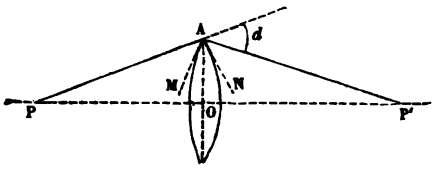


Fig. 395.

Recíprocamente, si el punto luminoso fuera llevado á P′, su foco conjugado estaría en P.

Cálculo de la distancia focal conjugada. — Ecuación de los focos conjugados. — Se puede *demostrar* la existencia del foco conjugado y calcular su distancia. En efecto, la imagen P′ debe ser el punto de reunión de los rayos emanados del punto P después de refracción. El eje principal (fig. 395) es á su vez uno de estos rayos; luego la imagen se encuentra en el eje principal. Sea SA otro rayo cualquiera, que experimenta la desviación d refractándose y va á cortar al eje principal en un punto P′ que es el foco conjugado. Sea p la distancia OP que se da y p' la distancia OP′ que se trata de determinar. Siendo el ángulo d exterior al triángulo APP′, se tiene $d = APP' + AP'P$.

Reemplazando d por su valor hallado anteriormente (fig. 394), y los ángulos por sus tangentes, resulta

$$[2] \qquad \frac{AO}{f} = \frac{AO}{p} + \frac{AO}{p'}, \quad \text{ó} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Tal es la ecuación fundamental de las lentes; llámasela de los *focos conjugados* porque es una relación entre las distancias focales de dos focos conjugados P y P′[1].

Á medida que el punto P se acerca á la lente, la divergencia de los rayos incidentes y de los divergentes va aumentando y por consiguiente el foco conjugado P′ se aleja. Si P coincide con el foco principal, los rayos emergentes salen paralelos al eje, y entonces ya *no hay foco*, ó según la expresión admitida, *el foco va á parar á lo infinito en la dirección del eje principal.*

3°. *Foco virtual.* — En el caso de que el punto luminoso P esté

1. Existe otro método, también clásico, para hallar esta ecuación. Lo indicamos más adelante (406, III), al hablar de las *lentes gruesas.*

colocado entre la lente y su foco principal (fig. 396), la *experiencia prueba* que el foco conjugado P′ es *virtual*.

Mientras más se acerca el punto P á la lente, más se aproxima también su foco virtual P′.

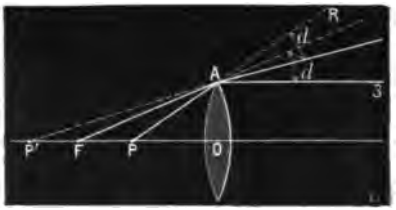


Fig. 396.

Cálculo de la distancia focal conjugada. — Supuesto que un rayo tal como FA, emanado del foco principal, emerja de la lente, paralelamente al eje principal, dedúcese que un rayo como PA, que debe emerger sufriendo la misma desviación *d*, no puede cortar al eje sino en su prolongación y al mismo lado de la lente. Sea P′ el punto de intersección; ese es el foco conjugado de P; obsérvase que es *virtual*.

Su distancia á la lente se calculará como antes. Por una parte se tiene en el triángulo APP′

$$d = \text{APO} - \text{AP}'\text{O}, \qquad \text{y por otra} \qquad d = \text{tang AFO}\,\frac{\text{AO}}{f}.$$

Acabando el cálculo como anteriormente, resulta

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \qquad [2]$$

Tal es la *ecuación de los focos conjugados* en el caso de los focos virtuales.

Se hubiera podido deducirla de la ecuación [1], conviniendo en cambiar de signo la magnitud p', que ha variado de sentido.

396. **Centro óptico.** — *La experiencia prueba* que en toda lente existe un punto llamado *centro óptico*, situado en el eje principal, y de tal naturaleza que todo rayo que por él pasa no sufre *desviación angular:* sale por un punto *más ó menos diferente lateralmente*, pero *paralelo á su dirección de incidencia.*

Cálculo de la posición del centro óptico. — Tracemos dos rayos de curvatura paralelos, CI y C′I′ (fig. 397); los dos elementos de los planos tangentes en I é I′ son paralelos entre sí, como perpendiculares á dos rectas paralelas: por consiguiente, todo rayo SI que incida sobre la lente atravesándola según II′, cruzará en realidad un medio de caras paralelas y por consiguiente saldrá *sin desviación*, quiere decir según una dirección I′R paralela á SI.

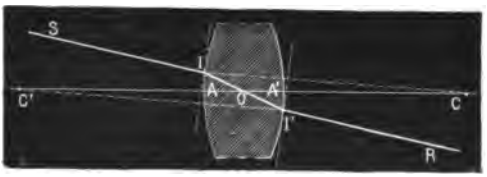


Fig. 397.

Ahora bien, consideremos los triángulos COI y C'OI' : son semejantes como equiángulos y dan

$$\frac{OC}{OC'} = \frac{CI}{C'I'} = \frac{R}{R'}.$$

Luego el punto O divide la línea de los centros CC' en dos segmentos proporcionales á los radios de curvatura : en consecuencia su posición es *invariable* é independiente del rayo considerado.

Restando miembro á miembro los términos extremos de la proporción, resulta

$$\frac{R}{R'} = \frac{R - OC}{R' - OC'} = \frac{OA}{OA'};$$

luego el punto O divide igualmente el grueso de la lente en dos segmentos proporcionales á los radios.

De modo que el centro óptico no está en medio de la lente sino en tanto cuanto se tiene R = R'.

Si la lente es plano-convexa, lo que corresponde al caso de que R' = ∞, se tiene OA = O : luego el centro óptico está en A, sobre la cara curva.

397. **Ejes secundarios. — Focos conjugados secundarios.** — Toda recta QQ' (fig. 398) que pasa por el centro óptico y por un punto luminoso Q es el *eje secundario* de este punto. Con arreglo á la propiedad del centro óptico, todo rayo que incide según el eje secundario QO emerge según la misma dirección OQ'; pues en el caso de las lentes *delgadas* se puede considerar como *despreciable* el desplazamiento lateral que experimenta el rayo QO.

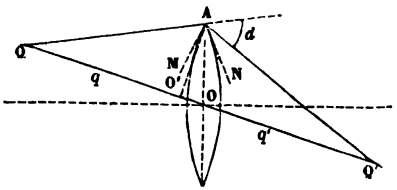


Fig. 398.

Además, si se consideran únicamente los ejes secundarios que no forman con el principal más que un pequeño ángulo, se puede aplicarles cuanto se ha dicho hasta aquí del eje principal : quiere decir que los rayos emitidos por un punto Q deben reunirse todos en un mismo punto P' de este eje, que es su *foco conjugado*. Así *lo prueba la experiencia*.

Cálculo de la distancia focal conjugada. — La imagen del punto luminoso Q está en el eje secundario QO ; también está en el rayo refractado correspondiente á un rayo incidente cualquiera QA : luego se halla en la intersección Q' de estas dos rectas. En el triángulo AQQ' el ángulo exterior es *d*, y se tiene

$$d = AQQ' + AQ'Q.$$

Sustituyendo estos ángulos por sus valores trigonométricos, resulta

$$\frac{AO}{f} = \frac{AO'}{q} + \frac{AO'}{q'}.$$

Ahora bien, AO′ es sensiblemente igual á AO, por efecto de la hipótesis de los ángulos pequeños; dividiendo los dos miembros por AO ó AO′, resulta

[2 *bis*] $$\frac{1}{f} = \frac{1}{q} + \frac{1}{q'}.$$

Es la misma ecuación anterior.

398. **Determinación experimental de los focos.** — Se recibe en la lente un haz solar paralelo al eje principal; después se busca con una pantalla, al otro lado de la lente, el punto donde va á concentrarse el haz : este es el foco principal.

También se puede deducir f de la ecuación de los focos conjugados, colocando en un punto dado la llama de una bujía y buscando con una pantalla, al otro lado de la lente, su foco conjugado : conociendo p y p', se calcula fácilmente f.

399. **Construcción de las imágenes.** — 1°. *Caso de las imágenes reales.* — *Las imágenes son reales en el caso de un objeto luminoso AB situado á distancia mayor que la distancia focal principal* (fig. 399).

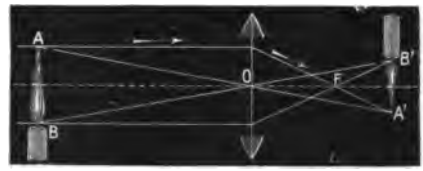


Fig. 399.

La construcción se reduce á la de los focos conjugados de los puntos A y B : trázanse los ejes secundarios AO y BO, y después rayos paralelos al eje principal, desde los puntos A y B. Estos rayos se refractan pasando por el foco principal F y van á formar en A′ y en B′ las imágenes de los puntos A y B. Uniendo A′B′ se tiene la imagen del objeto AB.

Esta imagen es *real é invertida.* Para verla hay que recibirla en una pantalla blanca donde se difunde en todas direcciones, ó colocar la vista en la prolongación de los rayos emergentes : así se distingue en el espacio una imagen que es *aérea,* lo mismo que en los espejos cóncavos.

Cálculo de la magnitud y de la distancia de la imagen. — Los triángulos ABO y A′B′O′, que son semejantes como equiángulos, dan

$$\frac{\text{A'B' ó I}}{\text{AB ú O}} = \frac{\text{O'P ó } p'}{\text{OP ó } p}.$$

Tiénese pues

$$\text{Como magnitud, } \mathrm{I} = \mathrm{O}.\ \frac{p'}{p},$$

$$\text{Como distancia, } p' = p\ \frac{f}{p-f}.$$

1°. Cuando el objeto está á una distancia de la lente igual *al doble de la distancia focal,* la imagen se encuentra *á la misma distancia por el otro lado,* y es *del mismo tamaño* que el objeto.

2°. Si el objeto está á distancia mayor que el doble de la distancia fo-

cal, la imagen es más pequeña que él; en el caso contrario es mayor.

3°. *Casos particulares.* — Cuando el objeto coincide con el foco principal, *la imagen es enviada al infinito*, quiere decir que *ya no hay imagen.* En efecto, los rayos tales como AI (fig. 400) dan en la emergencia un haz IF'OA', paralelo al eje secundario AO, y los emitidos desde B un haz paralelo á BO: no hay, pues, reunión de rayos á ninguna distancia y, en consecuencia, no se forma imagen.

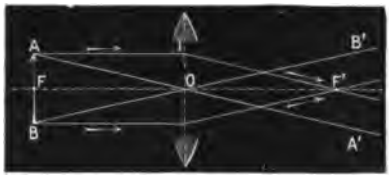


Fig. 400.

Observación. — En las lentes convergentes, como en los espejos cóncavos, la posición de la imagen es siempre *recíproca* de la del objeto, quiere decir que si éste pasara á A'B', su imagen se formaría en AB (fig. 399).

4°. *Caso de las imágenes virtuales.* — *Las imágenes son virtuales en el caso de un objeto luminoso AB situado entre la lente O y su foco principal F* (fig. 401),

Sea un objeto AB colocado en esta posición: si se repite la construcción antes apuntada, se ve fácilmente, considerando el trapecio AIOF, que su base menor es AI (< OF), y por consiguiente que lo que va á cortar los ejes secundarios OA (y OB) en A' (y B') son las prolongaciones de los rayos refractados. Los focos A' y B' son en consecuencia virtuales; lo mismo ocurre con todos los puntos de la imagen. Obtiénesela como anteriormente uniendo A'B'. *Esta imagen virtual es recta y mayor que el objeto.* Tiénese, como anteriormente

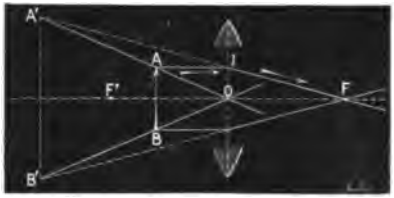


Fig. 401.

$$\frac{I}{O} = \frac{p'}{p} \qquad \text{y} \qquad \frac{p'}{p} = \frac{I}{f - p}.$$

400. **Lentes delgadas divergentes : Estudio geométrico y experimental.** — Cuando un haz luminoso *divergente*, que emana de un punto luminoso S, situado á distancia cualquiera, va á incidir sobre una lente cóncava, ésta se transforma en un haz *más divergente todavía* (fig. 402). Esto se explica observando que uno cualquiera de los rayos SI atraviesa un prisma como AII', cuya base es opuesta al eje principal. De ahí resulta que el rayo refractado I'R se desvía hacia el borde de la lente y no puede ir á cortar el eje sino en su prolongación; luego el foco conjugado está necesariamente al mismo lado de la lente que el punto luminoso : es un foco *virtual.*

1°. *Foco principal.* — Sea primeramente un haz SIS_1I_1 de rayos paralelos al eje fig. 403) : cada uno de los rayos tales como SI se refracta en el punto de inci-

dencia I experimentando una desviación *d* que lo aparta del eje y que depende del ángulo del prisma equivalente á la lente. Como todos los demás rayos, por ejemplo S_1I_1 sufren la misma desviación, resulta de ahí que los rayos, después de atravesar la lente, forman un haz divergente $FIRI_1R_1$. Las prolongaciones de estos rayos se encuentran en el eje principal en un punto F, que es el *foco principal virtual.*

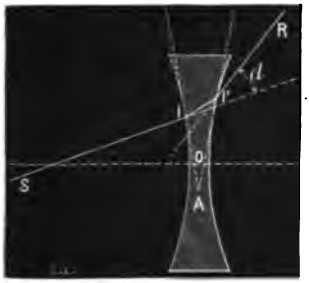


Fig. 402.

Determinación experimental. — Se cubre una de las superficies de la lente bicón-

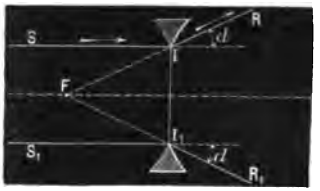


Fig. 403.

cava con negro de humo, reservando en una misma sección principal y á igual distancia del eje, en *a* y *b* (fig. 404) dos pequeños círculos claros, que dejan pasar la luz. Después se recibe en la cara opuesta, paralelamente al eje, un rayo de sol SS, y se va adelantando ó retirando una pantalla P hasta que los rayos

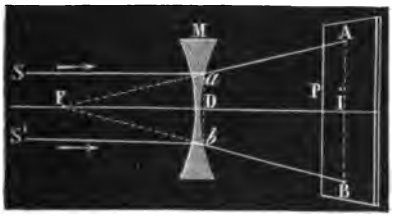


Fig. 404.

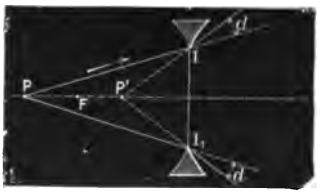


Fig. 405.

emergentes vayan á proyectar allí dos imágenes A y B cuya distancia sea doble de *ab*. Si se desprecia el grueso de la lente, se ve, por la semejanza de los triángulos F*ab* y FAB, que el intervalo DI es entonces igual á la distancia focal FD. Tiénese en efecto

$$\frac{FD}{FI} = \frac{ab}{AB} = \frac{1}{2}.$$

2°. *Focos conjugados virtuales.*— En el caso de que los rayos salgan de un punto P (fig. 405) situado en el eje, se halla por la misma construcción que en P' se forma un foco virtual entre el principal y la lente. La relación entre las distancias de los focos conjugados pasa á ser aquí

$$1] \qquad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

3°. *Construcción de las imágenes.* — Las lentes cóncavas no dan sino imágenes *virtuales*, lo mismo que los espejos convexos, sea cual fuere la distancia del objeto luminoso, con tal de que este objeto sea *real*.

Supongamos, en efecto, un objeto AB (fig. 406) colocado delante de una lente bicóncava, y á distancia cualquiera. Tracemos los *ejes secundarios* AO y BO, y después un rayo AI, paralelo al eje principal que se refracta dos veces, en I y E, apartándose de este eje de manera que el rayo emergente ED prolongado

vaya á pasar por el foco principal. El punto *a* donde corta al eje secundario AO, es la imagen virtual del punto A. Como la de B se construye del mismo modo en *b*, se tiene en *ab* la imagen de AB, que es siempre *virtual*, *recta* y *más pequeña que el objeto*. No es posible verla sino poniendo la vista en la dirección del haz emergente. También se tiene

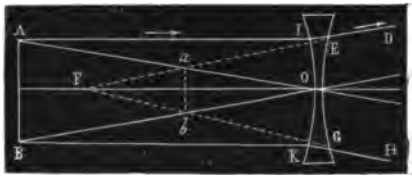


Fig. 406.

$$[2] \qquad \frac{I}{O} = \frac{p'}{p};$$

$\frac{p'}{p}$ está dado por la ecuación [1].

401. Discusión algébrica de la ecuación de los focos conjugados. — La forma general de la *ecuación de los focos conjugados*, que responde tan bien al caso de las lentes convergentes y al de las divergentes, es

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Para discutirla con facilidad, se le da una de las dos formas siguientes, que equivalen entre sí :

$$[2] \qquad p' = p\frac{f}{p-f}, \quad \text{ó} \quad p' = \frac{f}{1-\frac{f}{p}} \qquad [2\ bis]$$

Siendo $p = \infty$ (haz incidente paralelo al eje principal), se tiene $p' =$
$p > 2f$ se tiene $p' < 2f$
$p = 2f$ se tiene $p' = 2f$
$p > f$ (caso de un foco conjugado real) se tiene $p' > 0$
$p = f$ (haz refractado paralelo al eje principal) se tiene $p' = \infty$
$p < f$ se tiene $p' < 0$

Este valor negativo no es admisible y de ahí se deduce que ya no se aplica la fórmula. Ahora bien, si se plantea directamente la ecuación suponiendo la imagen virtual, se halla

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad \text{de donde se saca} \quad p' = p\frac{f}{f-p}.$$

La fórmula última da valores positivos y por consiguiente admisibles de p', para todos los valores de p inferiores á f. Esa es pues la ecuación que conviene en el caso de las imágenes virtuales[1].

Cuadro general de las fórmulas. — Se puede hallar la fórmula que conviene á cada caso particular de las lentes cambiando de signo las magnitudes que varían de sentido relativamente al caso simple inicial. Resumimos en el cuadro siguiente todos los casos que pueden presentarse

1. En vez de partir de la ecuación fundamental $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, se toma como base frecuentemente esta otra

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Obtiénesela en esta última forma cuando se admiten como *positivas* las magnitudes contadas desde el centro óptico hacia el lado *de donde viene* la luz, y como *negativas*, las magnitudes contadas *hacia el otro lado*.

SE PUEDE COLOCARLAS	LENTES CONVERGENTES		LENTES DIVERGENTES	
	Imágenes reales.	Imágenes virtuales.	Imágenes reales.	Imágenes virtuales.
1°. En un haz divergente. (*Caso general. — Objetos reales.*)	$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	No hay	$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}$
2°. En un haz convergente. (*Caso particular. — Objetos virtuales*).	$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f}$	No hay	$\frac{1}{p}\ \frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$	$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$

402. **Aberración de esfericidad.** — Un haz luminoso que incide sobre una lente, paralelamente al eje principal, se refracta como si incidiera sobre un prisma A' cuyo ángulo es variable y crece desde el eje, donde es nulo, hasta la periferia, donde es máximo. De manera que los rayos periféricos son más desviados que los centrales (fig. 407) y el foco principal G, que corresponde al haz paralelo periférico, está más cerca de la lente que el foco principal F de los rayos centrales, único que hasta aquí hemos considerado. He ahí en qué consiste la *aberración de esfericidad* en las lentes.

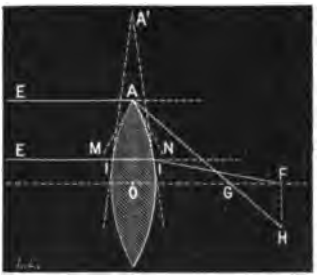


Fig. 407.

No sólo se produce con los rayos paralelos, sino también con los divergentes; pero no hay interés en considerar más que la primera, llamada á veces *aberración principal*. De este fenómeno resulta que la imagen de un punto luminoso muy lejano no es otro punto luminoso único : si se coloca una pantalla en F se obtiene un círculo luminoso de radio FH. Ocurriendo lo mismo con cada punto del objeto, no se puede obtener más que una *imagen confusa* de éste.

La distancia FG entre los dos focos principales se llama *aberración longitudinal*; la distancia FH es la *aberración lateral*.

403. **Aplanetismo.** — 1°. *Lentes aplanéticas.* — La experiencia prueba que si se reune una segunda lente á la primera, los dos focos F y G se acercan á ésta, y G más que F : de ahí resulta que la aberración disminuye por la interposición de una lente suplementaria. Eligiéndola de modo conveniente, hasta se logra suprimir por entero dicho defecto ; así se produce el *aplanetismo* del sistema convergente, y la lente compuesta se denomina *aplanética*.

No es posible obtener el aplanetismo con una lente única ; pero una elección oportuna de los radios de curvatura puede reducir la aberración á un *mínimum*. Demuéstrase por el cálculo, y la experiencia lo prueba, que se alcanza el mínimum de refracción para una lente de índice medio igual á n cuando se obtiene entre sus dos radios de curvatura la relación

$$\frac{R}{R'}=n.\frac{1+2n}{4+n-2n^2}.$$

En una lente de crown, cuyo índice es $\frac{3}{2}$, la relación pasa á ser $R' = 6\ R$.

Si se volviera una lente de esta clase, su aberración sería *tres veces* mayor; así se comprende el inconveniente que existe en *volver los vidrios* en los instrumentos de óptica.

2°. *Uso de los diafragmas.* — Se puede atenuar la aberración de las lentes ordinarias colocando delante de su superficie diafragmas taladrados por una abertura central: de esta manera pasan los rayos cercanos al centro, y se interceptan los que tienden á refractarse hacia los bordes. Así se realiza más ó menos el caso de los rayos centrales y se evita la aberración.

3°. *Uso de las lentes de escalones.* — Obtiénese un aplanetismo muy suficiente en la práctica por el uso de las lentes llamadas *de escalones.*

404. **Lentes de escalones.** — Las *lentes de escalones* suprimen los inconvenientes de las lentes de gran abertura, en particular su fuerte *aberración de esfericidad* y su poder absorbente, que es función de su grueso, y lo caro de su construcción. Estas lentes de escalones fueron ideadas por Buffon; pero las perfeccionó Fresnel.

Están formadas por una lente plano-convexa C (fig. 408 y 409) incrustada en una primera serie de anillos de vidrio A, B..., igualmente plano-convexos, que constituyen su periferia. Cada uno de estos anillos tiene su cara plana situada al mismo lado que la cara plana de la lente central, mientras que sus caras opuestas tienen una curvatura tal, que sus diversos focos van á formarse en el de la lente.

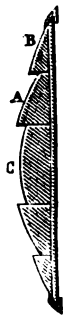


Fig. 408.

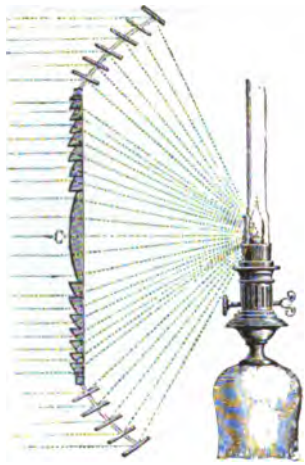


Fig. 409.

Según Buffon, los anillos esféricos de la periferia debían ser *concéntricos* á la porción central; pero Fresnel probó que el sistema no es aplanético sino en el caso de que los arcos generadores de los anillos no tengan el mismo centro [1].

Faros de Fresnel ó Faros catadióptricos. — Las lentes de Fresnel constituyen el órgano esencial de los faros actuales. La *luz* era en otra época una lámpara grande de cuatro á cinco mechas concéntricas (fig. 409). Hoy se recurre siempre que se puede á un arco voltaico. Colócasele en el foco principal de una lente de escalones, de modo que el haz emergente es paralelo, y como sólo lo debilita la absorción atmosférica, puede ser visible á distancias muy grandes. Para que todos los puntos del horizonte sean alumbrados sucesivamente, la lente se mueve alrededor de la lámpara, por medio de un mecanismo de relojería, efectuando su revolución en un tiempo que varía de un faro á otro. De esto resulta que para un mismo punto del horizonte hay sucesivamente aparición y eclipse de luz á intervalos iguales. Estos eclipses intermitentes sirven para distinguir los faros unos de otros ó bien de una luz accidental.

Se dice que el faro es *catadióptrico* (fig. 409) cuando se utilizan al mismo tiempo la reflexión y la refracción para aumentar su fuerza. En torno de la lente propiamente dicha se ve una serie de espejos planos, dispuestos en abanico, que reflejan horizontalmente los rayos luminosos más divergentes, aumentando así el haz.

1. Ni siquiera deben los diferentes centros estar situados en el eje de la lente; han de alejarse de éste tanto más cuanto más distantes del centro de la lente se encuentran los arcos á que pertenecen. De ahí resulta que esos arcos generadores, al girar en torno del eje, no engendran porciones de *superficies esféricas concéntricas*, sino porciones de superficies llamadas *anulares*.

405. Aberraciones debidas al grueso de las lentes. — En la refracción de la luz por lentes algo gruesas se produce otra aberración debida á la anchura. Gauss estudió este fenómeno planteando nuevas fórmulas que permiten construir las imágenes suministradas por las lentes y calcular sus elementos *teniendo cuenta del grueso*. Esto es lo que se llama *teoría de las lentes gruesas* de Gauss. Vamos á exponerla sumariamente, indicando algunos de sus resultados fundamentales, limitándonos por lo demás al caso de los *rayos centrales*.

406. Nociones sobre las lentes gruesas. — Teoría de los rayos centrales. — I. *Refracción de la luz por un medio indefinido de superficie refringente convexa.* — Supongamos que la luz pase del aire á un medio más refringente, tal como el vidrio, limitado de una parte por una superficie esférica convexa, y por la otra parte ilimitado.

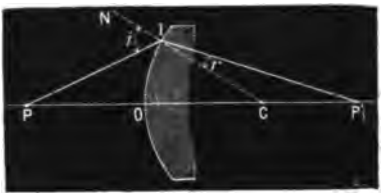


Fig. 410.

Sea P un punto luminoso situado en el eje principal de la superficie (fig. 410); sea PO un rayo luminoso normal á la superficie, y que penetra en ella sin desviación; PI otro rayo luminoso cualquiera, que se refracta según IP'$_1$: el punto P'$_1$ donde se cortan los dos rayos refractados es la *imagen* ó el *foco conjugado* del punto P. Busquemos una relación entre las distancias OP $= p$ y OP'$_1 = p'_1$ (contadas en valor absoluto como en los cálculos precedentes).

Los dos triángulos ICP é ICP'$_1$, que tienen el mismo vértice I y sus bases situadas en la misma recta, son en consecuencia de igual altura : en consecuencia, sus superficies son entre sí como sus bases. Resulta pues

$$[1] \qquad \frac{\text{superf. ICP}}{\text{superf. ICP}'_1} = \frac{\text{CP}}{\text{CP}'_1} = \frac{p + \text{R}}{p'_1 - \text{R}}.$$

Por otra parte, pueden expresarse las superficies de estos triángulos en función de sus ángulos en el vértice y del producto de los lados adyacentes. Se tiene

$$\text{superf. ICP} = \frac{1}{2}(\text{IP. IC. sen PIC}) = \frac{1}{2}(p\ \text{R sen}\ i).$$

y análogamente

$$\text{superf. ICP}'_1 = \frac{1}{2}(p'_1\ \text{R sen}\ r)$$

y, dividiendo estas igualdades miembro á miembro, y simplificando, resulta

$$[2] \qquad \frac{\text{superf. ICP}}{\text{superf. ICP}'_1} = n\frac{p}{p'_1},$$

Comparando las ecuaciones [1] y [2] se deduce la igualdad

$$[a] \qquad \frac{p + \text{R}}{p'_1 - \text{R}} = n\frac{p}{p'_1};$$

de donde

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'_1} = (n - 1)\frac{1}{\text{R}}.$$

Tal es la *ecuación de los focos conjugados* en el caso en que nos hemos puesto.

II. *Refracción de la luz por un medio indefinido de superficie refringente cóncava.* —

Supongamos que el punto luminoso, en vez de real sea virtual, comó P'_1 (fig. 411). Es, por ejemplo, el vértice de un haz convergente que fuera detenido en su marcha por una superficie cóncava de vidrio que lo separase del aire exterior.

Entre los rayos luminosos que componen este haz convergente, hay uno, tal como OO', que incide normalmente sobre la superficie cóncava: éste sigue su camino sin desviación según $O'P'_1$. Consideremos otro rayo incidente cualquiera tal como IP'_1: éste incide en I' sobre la superficie cóncava, formando un ángulo de incidencia que llamaremos r' (por analogía con los prismas), y sale del vidrio formando un ángulo de refracción que llamaremos i', Como el ángulo i' es mayor que r', el rayo refractado va á cortar al eje principal en un punto P' más cercano que el P'_1: este punto P' es el foco conjugado *real* del punto luminoso virtual P'_1. Busquemos la ecuación de los focos conjugados de estos dos puntos.

Fig. 411.

Sea p_1 la distancia $O'P'_1$ y p' la distancia $O'P'$, *contadas positivamente*, en valores absolutos, según lo ya convenido. Consideremos también los dos triángulos $I'C'P'_1$ é $I'C'P'$ que tienen el mismo vértice y la misma altura. Dan como anteriormente

$$[1] \qquad \frac{\text{superf. } I'C'P'_1}{\text{superf. } I'C'P'} = \frac{C'P'_1}{C'P'} = \frac{C'O' + O'P'_1}{C'O' + O'P'} = \frac{R' + p_1}{R' + p'}.$$

Tiénese análogamente, aplicando la fórmula trigonométrica de la superficie,

$$2] \qquad \frac{\text{superf. } I'C'P'_1}{\text{superf. } I'C'P'} = \frac{I'C' \times I'P'_1 \times \text{sen } P'_1 I'C'}{I'C' \times I'P' \times \text{sen } P'I'C'} = \frac{R'.\, p_1 \text{ sen } r'}{R'.\, p' \text{ sen } i'} = \frac{p_1}{p'} \cdot \frac{1}{n}.$$

Comparando las dos igualdades [1] y [2] resulta, después de reducir,

$$[b] \qquad -\frac{n}{p_1} + \frac{1}{p'} = (n-1)\frac{1}{R}.$$

Esta es la *ecuación de los focos conjugados*, en el caso en que nos hemos puesto.

III. *Refracción de la luz por una lente gruesa. — Ecuación de los focos conjugados.* — Sea ahora una lente gruesa OO' (fig. 411), P un punto luminoso situado en su eje principal. Busquemos el foco conjugado P'.

El rayo normal PO atraviesa la lente sin desviación según OO' y sale según O'P'. Basta con hallar otro rayo refractado. Consideremos un rayo incidente cualquiera tal como PI. Éste sufre una primera refracción según II'P', definida por la ecuación

$$[a] \qquad \frac{1}{p} + \frac{n}{p'_1} = (n-1)\frac{1}{R}.$$

Análogamente, la segunda cara de la lente hace experimentar al rayo II' una segunda refracción, de modo que el rayo emerja según I'P', yendo á cortar el eje en un punto P' que es la *imagen* ó el foco conjugado del punto P. Esta segunda refracción está determinada por la ecuación

$$[b] \qquad -\frac{n}{p_1} + \frac{1}{p'} = (n-1)\frac{1}{R'}.$$

Además, entre las incógnitas auxiliares p_1 y p'_1 y el grueso e de la lente se tiene la relación

$$[c] \qquad p'_1 = p_1 + e$$

Es pues posible eliminar entre las tres ecuaciones [a] [b] y [c] las incógnitas

auxiliares p_1 y p'_1 y subsistirá una relación entre p, p' y los elementos de la lente gruesa (e, n, R y R'), que será la *ecuación de los focos conjugados.*

Observación. — *Aplicación á las lentes delgadas.* — Las ecuaciones [a] y [b] pueden transformarse de la manera siguiente después de la eliminación de p'_1 :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p_1 + e} = \frac{n-1}{R}, \qquad \frac{1}{p'} + \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{R'}.$$

Si efectuamos la suma de estas igualdades miembro á miembro, suponiendo e despreciable, los dos términos en p_1 se anularán en la suma y resultará

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

Esta es la ecuación de los focos conjugados en las *lentes delgadas.*

407. **Puntos nodales.** — *Rayos sin desviación.* — En toda lente gruesa hay siempre un *centro óptico;* pero si bien el rayo luminoso que por él pasa no sufre desviación, sí efectúa un *cambio de lugar.* Por tanto, un punto luminoso como Q, situado fuera del eje principal de la lente gruesa (fig. 412) no tiene *eje secundario propiamente dicho;* sin embargo, existe siempre una dirección de incidencia á que corresponde un rayo emergente *paralelo.* Puede hacerse la construcción necesaria por medio de los *puntos nodales.*

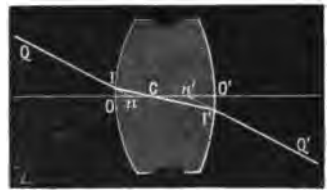


Fig. 412.

1°. *Definición.* — Llámase *puntos nodales* á los focos conjugados n y n' del centro óptico de la lente relativamente á sus dos superficies refringentes IO é I'O'.

Sea QI I'Q' el rayo luminoso emanado del punto Q, que emerge *sin desviación,* pasando por el centro óptico C de la lente gruesa (fig. 412). Sean n y n' los puntos en que el eje principal es cortado por las prolongaciones de los rayos QI y Q'I'. Vamos á demostrar que los puntos n y n' son los *puntos nodales* antes definidos.

Averigüemos, en efecto, cuál sería el foco conjugado respecto de la superficie refringente OI de un punto luminoso que estuviera situado en C. El rayo, dirigido según el eje principal O'O, atraviesa la superficie sin desviación : luego el foco conjugado de C está en esta línea. Basta con tener otro rayo refractado, correspondiente á un rayo incidente emanado de C. Ahora bien, según el principio del *regreso inverso de los rayos,* como IC es, por construcción, la dirección de refracción que corresponde á la dirección de incidencia QI, el rayo refractado en el aire que corresponde al incidente CI en el vidrio, es precisamente IQ.

La prolongación de este rayo corta al eje principal en n : luego n es el foco conjugado de C con relación á la superficie OI.

Del mismo modo se demostraría que n' es el foco conjugado de C relativamente á la superficie refringente O'I'. Luego, los dos puntos n y n' son invariables como el centro óptico : por lo demás, se habría podido determinarlos con ayuda de las ecuaciones de los focos conjugados [a] y [b] [2°].

2°. *Propiedad de los puntos nodales.* — Todo rayo como QII'Q' que en su paso á través de la lente corta al eje en el centro óptico, sale paralelamente á sí mismo. Esta es una propiedad del centro óptico. Además, este rayo es tal que las prolongaciones de sus dos partes exteriores pasan por los dos *puntos nodales:* esta es la propiedad característica de los *puntos nodales.*

6°. *Construcción del rayo sin desviación.* — El rayo, tal como QII'Q', desempeña respecto de los puntos luminosos tales como Q', exteriores al eje principal, el mismo papel en el caso de las lentes gruesas que el eje secundario en las lentes delgadas. En este *rayo sin desviación* es donde debe hallarse el foco conjugado Q'.

Se le construirá fácilmente por medio del centro óptico C y de los puntos nodales. Empezaremos por colocar los puntos C, n y n' sobre el eje principal, lo que será fácil, dadas la definición del punto C y las ecuaciones de los focos conjugados [a] y [b]. Unamos el punto Q con el primer punto nodal n : la dirección

Qn es con evidencia la del rayo incidente; unamos el punto I con el C, y prolonguemos hasta la intersección I' con la segunda cara de la lente : la dirección ICI' es evidentemente el trayecto del rayo en el grueso de la lente; unamos por fin n'I' y prolonguemos al exterior; esta dirección I'Q' es evidentemente el rayo emergente. Ahí es donde debe hallarse el foco conjugado del punto Q.

408. **Planos principales.** — Un rayo incidente PI, paralelo al eje, se refracta según II'$_1$ F$_1$ (fig. 413). Los rayos incidente y emergente se cortan al prolongarse, en

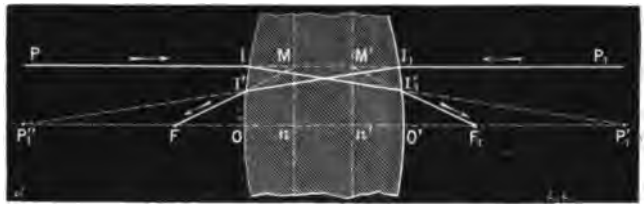


Fig. 413.

M'. Sea M n' una perpendicular bajada desde M' al eje. Los dos grupos de triángulos semejantes P'$_1$OI (supónese á I cercano de O) y P'$_1$O'I'$_1$, F$_1$O'I'$_1$ y F$_1$M'n' dan respectivamente

$$\frac{IO}{I'O'} = \frac{OP'_1}{O'P'_1}, \qquad \frac{M'n' \text{ ó } I'O}{I'_1O'} = \frac{n'F_1}{O'F_1};$$

luego

$$[1] \qquad \frac{OP'_1}{O'P'_1} = \frac{n'F_1}{O'F_1}.$$

Los puntos O, O' son fijos como vértices de la lente, P'$_1$ es uno de los focos principales relativos á la cara O; luego el punto F$_1$ conjugado de P'$_1$ respecto de la segunda cara O' es fijo como P'$_1$. La ecuación [1] expresa en consecuencia que el punto n' es á su vez invariable cuando cambia IO.

Los puntos de intersección M' de los rayos incidentes paralelos al eje y de los rayos emergentes están pues situados todos en el plano n'M', que ha recibido el nombre de *plano principal de emergencia*. Existe evidentemente un *plano principal de incidencia* que disfruta de la misma propiedad relativamente á los rayos que emergen paralelamente al eje.

Uniendo á la ecuación [1] la condición [b] que expresa la conjugación de P'$_1$ y F$_1$ respecto de la cara O' y el valor de la distancia focal O'P'$_1$ (456), se calcula fácilmente la distancia focal principal n'F$_1$.

Del mismo modo se procede para obtener nF.

Si la lente está bañada en sus dos caras por un mismo medio, *cosa que supondremos en todo lo que sigue*, se encuentra que los dos segmentos n'F$_1$ y nF son iguales.

Es claro que dos puntos tales como M y M' situados á la misma altura en los dos planos principales, son conjugados.

Fig. 414.

Efectivamente, los dos rayos P$_1$M', F$_1$M' pueden considerarse como resultante de la refracción de los rayos PM, FM que salen de M.

En particular los puntos n y n' son conjugados.

Observación. — Los puntos nodales, de que ya se ha hablado, coinciden con n y n'.

Consideremos en efecto un rayo cualquiera AN que se dirija sobre n; pasará por n' después de refracción, toda vez que n y n' son dos puntos conjugados

(fig. 414). Es fácil hallar la dirección del rayo emergente. En efecto, An encuentra al plano focal F en N, el rayo NQ se refracta según QF' : luego An se refracta según n'R, paralela á QF' (los rayos Nn, NQ proceden de un mismo punto N del plano focal F).

Ahora bien, como los segmentos nF y n'F' son iguales, QF' es paralela á An : luego el radio n'R emerge paralelamente á su dirección de incidencia An.

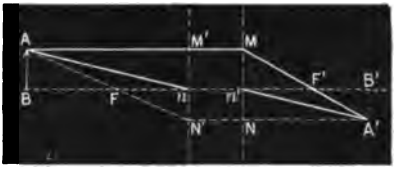


Fig. 415.

Construcción de las imágenes. — La construcción de la imagen de un punto A es muy sencilla, puesto que se encuentra en la intersección de la línea n'A', paralela á An, y de MF'A', obteniéndose el punto M trazando por A una paralela al eje hasta su encuentro con el plano principal de emergencia n' (fig. 415).

AFN' es un tercer rayo notable que también se puede utilizar.

Los triángulos semejantes AM'N', F n N' dan

$$\frac{M'N'}{nN'} = \frac{AM'}{Fn} \quad \text{ó} \quad \frac{AB + A'B'}{A'B'} = \frac{AM'}{Fn}. \qquad [2]$$

Los triángulos semejantes A'NM, F'n'M dan por otra parte

$$\frac{MN \text{ ó } M'N'}{Mn'} = \frac{A'N}{F'n'} \quad \text{ó} \quad \frac{AB + A'B'}{AB} = \frac{A'N}{F'n' \text{ ó } Fn}, \qquad [3]$$

siendo iguales las dos distancias focales.

Las ecuaciones [2] y [3] pueden escribirse

$$\frac{A'B'}{AB + A'B'} = \frac{Fn}{AM'}, \qquad \frac{AB}{AB + A'B'} = \frac{Fn}{A'N};$$

luego, sumando resulta

$$1 = \frac{Fn}{Am'} + \frac{Fn}{A'n} \quad \text{ó} \quad 1 = \frac{f}{p} + \frac{f'}{p'},$$

fórmula semejante á la de las lentes delgadas (406, III, observ.); aquí f y f' tienen el mismo valor absoluto, puesto que se suponen idénticos los medios extremos.

En resumen, con tal de desdoblar el origen y de tomar respectivamente los puntos n y n' como principio de los segmentos de incidencia y de los de emergencia, las fórmulas y construcciones sentadas para las lentes delgadas se aplican sin modificación á las lentes gruesas consideradas.

CAPITULO IV

CROMÁTICA [1].

DISPERSIÓN Y ACROMATISMO. — ANÁLISIS ESPECTRAL.

409. Descomposición de la luz blanca. — Espectro solar. — El fenómeno de la refracción no es tan sencillo como hasta ahora

1. De χρωμα, color. Parte de la óptica en que se estudian los *colores* del espectro solar.

hemos supuesto : cuando la luz que pasa de un medio á otro es la *blanca*, procedente del sol ó de un cuerpo sólido incandescente, no sólo hay desviación, sino también *descomposición* de esta luz blanca *en varias especies de luces de diversa coloración*. Este fenómeno, descubierto y estudiado por Newton, se llama *dispersión*.

1°. *Experiencia fundamental.* — Recíbese en un cuarto cerrado ó en una cámara oscura un haz solar SA (fig. 416), á través de una pequeña abertura. Este haz tiende á ir á formar en K una imagen redonda y blanca del sol; pero si se interpone á su paso un prisma de

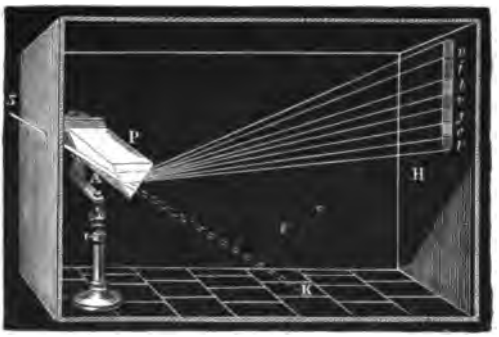


Fig. 416.

flint-glass P, dispuesto horizontalmente, el haz se refracta á la entrada y salida del prisma en un plano vertical, y va á producir en una pantalla distante, no la imagen redonda y blanca, sino otra H, de la misma dimensión horizontal, pero prolongada en sentido vertical, y *teñida con los colores del arco iris*. Newton dió á esta imagen el nombre de *espectro solar*.

Son muchísimos los tonos que existen en el espectro; pero sólo se distinguen claramente siete principales, que se suceden en el orden siguiente :

violado, índigo, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo,

empezando por el color más desviado (fig. 1, planchas de color I y II). Estos colores no ocupan todos la misma extensión en el espectro; el violado es el más ancho, y el anaranjado el más estrecho.

2°. *Cálculo de la dispersión.* — La *dispersión* propiamente dicha es igual á la *diferencia* de las desviaciones sufridas por los dos rayos extremos. Sean δ la dispersión, D_v la desviación del violado y D la del rojo por un prisma de ángulo A, n_v y n_r los índices del violado y del rojo; aplicando la fórmula de los prismas de pequeña abertura (395) se tiene :

$$\delta = D_v - D_r = A\,(n_v - 1) = A\,(n_r - 1) = A\,(n_v - n_r).$$

La dispersión no es por tanto *igual* sino *proporcional* á la variación de índices para los colores extremos.

Esta fórmula pone también de manifiesto que la *dispersión es proporcional al ángulo refringente* del prisma y por tanto, que la *extensión del espectro es proporcional al poder dispersivo* de la sustancia refringente [1].

3°. *Espectro de las luces artificiales.* — En los espectros de las luces artificiales no se observan más colores que los del espectro solar y su orden es el mismo; pero, en general, faltan algunos. Su intensidad relativa se modifica igualmente mucho. El tono que domina en una llama artificial es también el que predomina en su espectro. Las llamas amarillas, rojas, verdes, producen espectros en que el tinte dominante es el amarillo, el rojo, el verde.

410. **Producción de un espectro puro. — Regla de Newton.** — Un espectro es tanto más *puro* cuanto mejor separados se encuentran los haces de colores. Se obtiene uno en buenas condiciones recibiendo los rayos solares por una hendidura paralela á la arista refringente del prisma, colocando éste muy cerca de esa hendidura y la pantalla bastante lejos, á unos 5 ó 6 metros. Alcánzase pureza completa aplicando la *regla de Newton.*

Recíbese la luz por una hendidura delgada, paralela á la arista refringente de los rayos, y se interpone en el trayecto de los rayos incidentes (por la parte de acá ó la parte de allá del prisma) una lente acromática á una distancia de la hendidura igual á 2 f., colócase la pantalla al otro lado de la lente, y á la misma distancia 2 f., por fin se tiene cuidado de orientar el prisma en la posición de la desviación mínima.

411. **Los colores del espectro son simples y desigualmente refrangibles.** — Si se aisla uno de los colores del espectro interceptando los otros por medio de una pantalla E (fig. 417), y se le hace pasar á través de otro prisma B, se observa también una desviación, pero ya no hay *dispersión:* este rayo aislado conserva el mismo color. De aquí se deduce que los colores del espectro son *simples*, es decir, *indescomponibles por el prisma.*

Fig. 417.

Además, los colores del espectro son desigualmente *refrangibles.* La forma prolongada de éste bastaría para demostrarlo; pero se puede hacerlo directamente por gran número de experiencias. Describimos en particular la de los *prismas cruzados.*

Experiencia de los prismas cruzados. — En un primer prisma A (fig. 418), dispuesto horizontalmente, se recibe un haz de luz blanca S,

1. Para el flint-glass, la dispersión es 0,0433; para el crown-glass, es de 0,0246, quiere decir mitad próximamente de la anterior.

que va á formar un espectro vertical *rv* sobre una pantalla lejana. Si entonces se coloca verticalmente un segundo prisma B detrás del primero, de manera que sea atravesado á su vez por el haz refractado, el espectro se mueve á lo largo del prisma vertical ; pero en

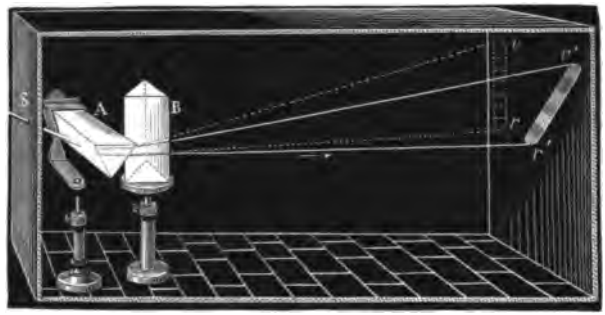


Fig. 418.

vez de serlo paralelamente á sí mismo, como ocurriría si todos los colores del espectro fueran igualmente refractados, es dirigido de manera oblicua hacia *r'v'* : luego, los colores son cada vez más refrangibles á medida que se va del rojo al violado.

Así pues, el índice de refracción varía para cada color y aun para los rayos de un mismo color. Por ejemplo, en la zona roja los rayos que forman la extremidad del espectro se refractan menos que los próximos á la zona anaranjada. Así es que se ha convenido en tomar como índice de una sustancia el índice medio del amarillo en el espectro dado por esta sustancia.

412. **Recomposición de la luz blanca.** — Después de haber descompuesto la luz blanca, faltaba por demostrar que se puede también reconstituirla. Esto puede efectuarse por varios métodos.

1°. *Prismas inversos.* — Si se recibe el espectro sobre un segundo prisma del mismo ángulo refringente que el primero, pero vuelto en

Fig. 419.

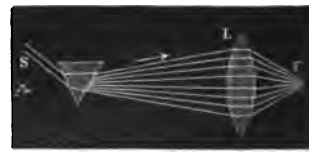


Fig. 420.

sentido contrario (fig. 419) el segundo anula la dispersión del primero, y so obtiene un haz emergente E, paralelo al incidente y *blanco*. Las cosas ocurren, pues, como si el haz incidente hubiera atravesado

una lámina de caras paralelas, formada por la yuxtaposición de los dos prismas.

2°. *Lente convergente.* — Recíbese el espectro sobre una lente biconvexa (fig. 420) y colocando en su foco una pantalla blanca, se recoge allí una imagen blanca del sol.

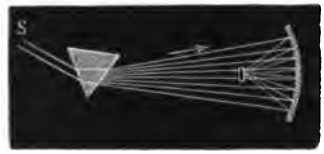


Fig. 421.

3°. *Espejo cóncavo.* — Se hace incidir el espectro sobre un espejo cóncavo (fig. 421); colocando en el foco una pantalla de vidrio sin pulimentar, se recoge una imagen blanca.

4°. *Siete espejos planos.* — Recíbense los siete colores del espectro respectivamente en siete espejos de vidrio, de caras perfectamente paralelas, y que pueden inclinarse en todos sentidos (fig. 422). Dirigiendo convenientemente estos espejos se hacen incidir primero, en

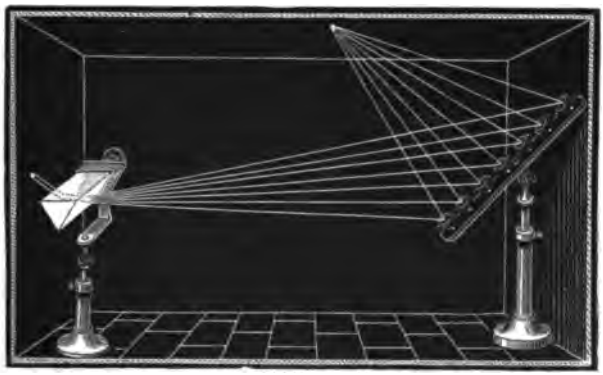


Fig. 422.

el techo ó en una pared, los siete haces reflejados, que producen allí siete imágenes distintas, rojo, anaranjado, amarillo, etc.; después se dirigen los espejos de manera que las siete imágenes vayan á superponerse exactamente y se obtiene una imagen única, que es blanca.

5°. *Disco de Newton.* — Por fin, puede producirse la sensación de la luz blanca con el disco coloreado de Newton. Es un disco de cartón de 30 centímetros de diámetro próximamente; el centro y los bordes son negros, y en el intervalo hay pegadas bandas de papel rojas, anaranjadas, amarillas, verdes, azules, índigo y violadas, que van del centro á la circunferencia, de modo que constituyen cinco espectros circulares sucesivos (fig. 423). Si se imprime á este disco un movimiento rápido de rotación, la retina recibe casi simultánea-

mente la impresión de los siete colores del espectro, y el disco parece blanco (fig. 424), ó por lo menos de blanco agrisado, pues los colores que lo cubren no son exactamente los del espectro.

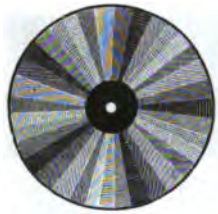


Fig. 423.

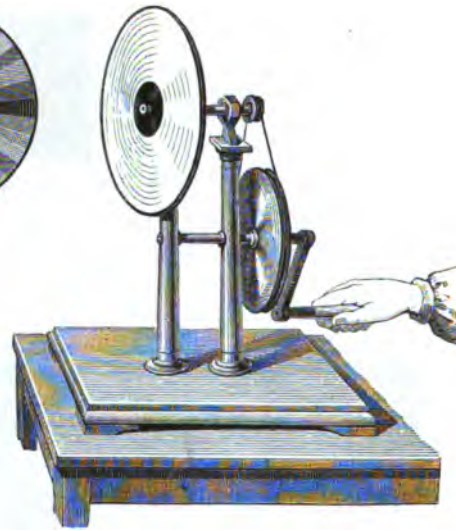


Fig. 424.

413. **Composición de la luz y color de los cuerpos : Teoría de Newton.** — Newton sacó dos conclusiones de estas diversas experiencias :

1°. La luz blanca no es homogénea, sino que está formada por otras siete *simples y desigualmente refrangibles*, á que dió el nombre de colores *simples* ó *primitivos*.

2°. Estos colores simples se separan atravesando el prisma en virtud de su *diferencia de refrangibilidad*.

Según Newton, los cuerpos descomponen también la luz por reflexión, y su color propio depende sólo del poder reflector que tienen para los diferentes colores simples. Los que los reflejan todos, en las proporciones que tienen en el espectro, parecen *blancos*, los que los absorben todos son *negros*. Por fin, entre estos dos límites se presentan infinidad de tonos determinados por la proporción de los rayos simples, reflejados ó extinguidos para cada cuerpo. De consiguiente, con arreglo á esta hipótesis los cuerpos deben su color, no á una propiedad intrínseca, sino á la especie de luz que reflejan.

El color de los cuerpos varía también con la naturaleza de la luz. Así sucede con la luz del gas y de las bujías, en las cuales domina el amarillo, y que comunican este tono á los objetos que alumbran.

Análisis físico de los colores. — Se corta una banda estrecha del cuerpo cuyo color se quiere analizar, se la fija en un fondo negro y se la ilumina fuertemente. Mirando con un prisma, á la distancia de uno ó dos metros, la luz reflejada ó difundida por la pequeña banda, se la descompone y se analizan los colores simples que constituyen el color propio del cuerpo. De esta manera se ha probado que *el color es compuesto en todos los cuerpos.* Por ejemplo, los pétalos de las flores dan un espectro matizado con varios colores simples.

414. **Colores complementarios.** — Newton llamó *colores complementarios* á los que producen el blanco al superponerse. El verde es complementario del rojo, el azul del anaranjado, el violado del amarillo. Todo color tiene otro que le es complementario; pues no siendo blanco, le faltan algunos de los del espectro para dar luz blanca; la mezcla de estos últimos colores debe producir en consecuencia un color compuesto, complementario del primero. De modo que los colores complementarios pueden ser á su vez simples ó compuestos.

415. **Constitución del espectro solar : Espectros luminosos, calorífico y químico.** — Newton no conoció más que la parte coloreada y visible del espectro. Pero la radiación que constituye el espectro tiene mucha mayor extensión y se compone en realidad de tres partes distintas : 1°. de los rayos luminosos que, actuando sobre la retina, constituyen el espectro propiamente dicho; 2°. por la parte, acá del rojo, rayos impropios para excitar la visión, pero que tienen poder calorífico mucho mayor que las otras partes del espectro : estos son los *rayos caloríficos* ó *infrarojos*, constitutivos del *espectro calorífico ;* 3°. más allá del violado, rayos impropios también para la visión, como los anteriores, y de escaso poder calorífico, pero dotados de gran energía química : son los *rayos químicos* ó *ultraviolados*, que constituyen el *espectro químico.* Así es que en la luz blanca hay tres especies de radiaciones, *luminosas, caloríficas* y *químicas*, que se pueden separar más ó menos por medio de prismas.

416. **Espectro luminoso : Poder luminoso de los diversos haces del espectro. — Experiencia de Draper.** — Según los experimentos de Fraünhofer y de Herschel, el máximum de intensidad de la luz se encuentra en el *amarillo* y el mínimum en el *violado.*

La composición de la parte visible del espectro varía con la temperatura del foco luminoso : así lo prueba el siguiente experimento de Draper. Cuando se hace pasar por un alambre de platino una corriente eléctrica cuya intensidad va aumentando sucesivamente, el alambre se calienta cada vez más y empieza á volverse luminoso á eso de los 500°. Pues bien, si se analiza por medio de un prisma la luz que emite este alambre, no se obtienen primero sino rayos rojos ; pero como la intensidad de la corriente sigue aumentando, el alambre se calienta más, y después del rojo aparece el anaranjado. Á medida que la temperatura va subiendo, el amarillo sucede al anaranjado, y después vienen el verde, el azul, el índigo y, por fin el violado, cuando el platino está á la temperatura *blanca.*

417. **Espectro calorífico.** — Si se recibe un haz de luz solar en un prisma de sustancia perfectamente *diatermana* (quiere decir, *transparente para el calor*), tales como la sal gema, los rayos caloríficos oscuros se ensanchan, como los luminosos, perpendicularmente á las aristas del prisma, y forman de esta manera un *espectro calorífico.*

Esta experiencia prueba que el calor, como la luz, está compuesto de varias

especies de rayos desigualmente refrangibles. Se les pone de manifiesto por medio de un *termoscopio* muy sensible, tales como una *pinza termo-eléctrica*.

Representación del espectro calorífico. — Márcase en la recta AV (fig. 425) una longitud proporcional á la extensión total de la radiación calorífica en el espectro, y en esta recta se levantan perpendiculares proporcionales á las intensidades caloríficas en cada punto. Muller, de Friburgo, ha obtenido de esta manera la

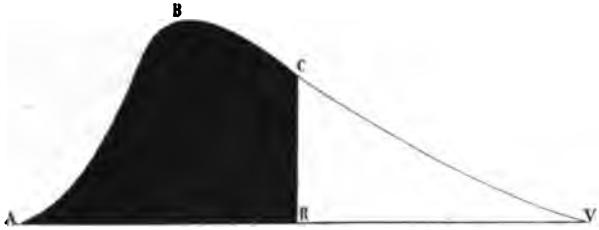


Fig. 425.

curva ABCV ; la parte VCR corresponde á la radiación calorífica en el espectro visible, del violado hasta el rojo, y la parte negra RCBA á la misma radiación en la región infraroja. Se ve que el máximum de calor se verifica en B, mucho más acá del rojo, y que la extensión total del espectro calorífico es casi igual á la del espectro luminoso.

418. **Aberración de refrangibilidad.** — Puesto que las lentes refractan la luz como los prismas, también deben descomponerla. De aquí resulta que las imágenes que producen presentan en su contorno los colores del iris. Este defecto se llama *aberración de refrangibilidad*. Cuando una lente convergente, pongamos por ejemplo, recibe un haz de luz blanca, paralelo á su eje principal, los rayos rojos, que son los menos refrangibles, van á formar su foco principal en un punto *r* (fig. 426), mientras que los violados se reunen en otro más próximo *v*. Entre estos límites se orman los focos anaranjado, amarillo, verde, azul é índigo. La aberración de refrangibilidad es tanto más sensible cuanto más convergentes son las lentes y más distantes del eje los rayos incidentes.

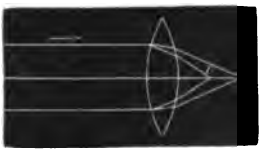


Fig. 426.

419. **Efecto de aberración de refrangibilidad : Irisación de los objetos vistos á través de un prisma.** — Cuando se mira un cuerpo á través de un prisma, las partes de su contorno que son paralelas á las aristas de aquél parecen teñidas con los colores del espectro : entonces se dice que la imagen aparece *irisada*.

Este fenómeno es un efecto de aberración de refrangibilidad, y se explica por la desigual refrangibilidad de los rayos reflejados por el cuerpo. Si se mira, pongamos por ejemplo, una banda *muy estrecha* de papel blanco pegada en un cartón negro, con un prisma cuyas aristas le sean paralelas, se la creería teñida con todos los colores del espectro, y el color más subido hacia el vértice del prisma es el violado. En esta experiencia, la luz blanca que difunde la banda de papel se descompone al atravesar el prisma y como el color más refrangible es el violado, es el que más se desvía y parece más elevado que todos los demás.

420. **Acromatismo.** — Combinando prismas cuyos ángulos refringentes son distintos y que están formados de sustancias igualmente dispersivas, se ha logrado refractar la luz blanca sin descomponerla. El mismo resultado se obtiene por medio de lentes de sustancias diferentes cuyas curvaturas se combinen de modo conveniente. Los contornos de los objetos, vistos á través de estos sistemas de prismas ó de lentes, ya no parecen irisados: dícese que estos sistemas refringentes son *acromáticos*, y se llama *acromatismo* á la supresión de la aberración por refrangibilidad.

Fig. 427.

Dollond, óptico de Londres, fué quien primero demostró, en 1757, que yuxtaponiendo dos lentes, una biconvexa de crown-glass y la otra cóncavo-convexa de flint (fig. 427) se obtenía una lente sensiblemente acromática.

421. **Teoría del acromatismo (rayos centrales).** — I. *Caso de los prismas.* — 1°. *Lema ordinario. — La desviación total producida en un rayo simple por dos ó más prismas sucesivos es la suma algébrica de las desviaciones parciales.* Las desviaciones parciales *se cuman* cuando los prismas están orientados en el mismo sentido (fig. 428, I), y *se restan* si los prismas están orientados en sentidos contrarios (II). Efectivamente, en el primer caso la desviación total D es el ángulo exterior de un triángulo KAA_1, que tiene como ángulos en la base las desviaciones parciales d y d_1. En el segundo caso, el ángulo D es á su vez uno de los ángulos en la base, mientras que el exterior ha pasado á ser una de las desviaciones parciales y se tiene $D = d - d_1$.

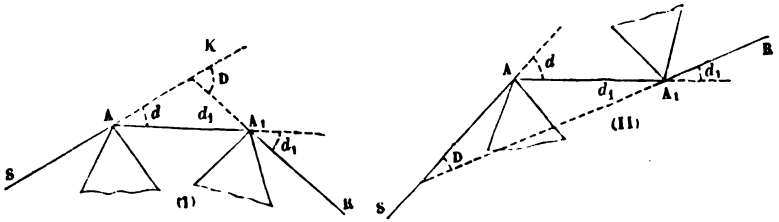


Fig. 428.

2°. *Fórmula de la dispersión.* — Consideremos ahora un sistema de dos prismas reunidos en sentido contrario, de ángulos refringentes A y A', y desigualmente refringentes. Si m y m' son los dos índices correspondientes á un mismo rayo del espectro, la desviación total del mismo será, según la fórmula de los prismas pequeños,

$$D = A\,(m - 1) - A'\,(m' - 1).$$

Para otro rayo, definido por sus índices $m + \Delta m$ y $m + \Delta m'$, se tendrá

$$D + \Delta D = A\,(m + \Delta m - 1) - A'\,(m' + \Delta m' - 1).$$

La variación total de desviación, ΔD, es decir, la *dispersión*, será pues

$$\Delta D = A\Delta m - A'\,\Delta\, m'.$$

3°. *Ecuación y condición de acromatismo.* — Así pues, si se eligen los índices y los ángulos refringentes de los prismas de manera que

$$A\Delta\, m = A'\Delta m', \qquad \text{se tendrá} \qquad \Delta D = 0,$$

es decir que *la dispersión será nula* y el prisma compuesto *acromático para estos dos colores*. La ecuación

$$[1] \qquad A\Delta m - A'\Delta m' = 0 \qquad \text{ó bien} \qquad \frac{A}{A'} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}$$

se llama *ecuación de acromatismo*. En ella está expresada la condición de acromatismo de los prismas : *los ángulos refringentes de los dos prismas reunidos en sentidos inversos deben ser inversamente proporcionales á las dispersiones de los dos rayos.*

El cociente $\frac{A}{A'}$, se determina *experimentalmente*, para dos sustancias de refringencia desigual, por medio de aparatos especiales llamados *diasporámetros*.

II. *Caso de las lentes.* — Una lente convergente unida con una divergente forma un sistema que equivale al de dos prismas de ángulos opuestos. Llamando y los diámetros, que suponemos iguales, de las dos lentes, R y R_1 los radios de curvatura de una y R' R'_1 los de la otra, se sabe que los ángulos refringentes A y A' de los dos prismas equivalentes están determinados por las fórmulas conocidas

$$A = y\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \qquad \text{y} \qquad A' = y\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

Por otra parte, es posible expresar las curvaturas de las dos lentes con ayuda de las fórmulas conocidas

$$\frac{1}{f} = (m - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right) \qquad \text{y} \qquad \frac{1}{f} = m' - 1)\left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R'_1}\right).$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación [1] anterior, pasa á ser

$$\frac{\dfrac{\frac{1}{f}}{m-1}}{\dfrac{\frac{1}{f'}}{m'-1}} = \frac{\Delta m'}{\Delta m}, \quad \text{de donde} \quad \frac{\dfrac{\Delta m'}{m'-1}}{\dfrac{\Delta m}{m-1}} = \frac{\dfrac{1}{f}}{\dfrac{1}{f'}}.$$

Tal es la ecuación del *acromatismo* de las lentes.

Como los cocientes $\frac{\Delta m}{m-1}$ y $\frac{\Delta m'}{m'-1}$ se llaman *poderes dispersivos* de las lentes (para los dos rayos que se trata de acromatizar) puede decirse que dos lentes forman un sistema acromático para dos colores del espectro cuando *sus poderes convergentes son inversamente proporcionales á sus poderes dispersivos.*

Observación. — Se ve por lo demás que, contrariamente á lo que pensaba Newton, es posible destruir la dispersión sin anular la refracción, puesto que la ecuación de acromatismo expresa que $\Delta D = 0$, pero no que $D = 0$.

Lentes acromáticas. — Las lentes acromáticas se forman con dos lentes de sustancias igualmente dispersivas. Una A, de flint, es cóncavo-convexa divergente (fig. 427) ; la otra, B, de crown-glas, es biconvexa, y una de sus caras coincide exactamente con la cara cóncava de la primera. Con las lentes se necesitarían, como en el caso de los prismas, siete vidrios para obtener un acromatismo perfecto ; pero en general bastan dos en todos los instrumentos de óptica : se les da la curvatura necesaria para acromatizar los rayos *rojo* y *amarillo*.

422. **Absorción de la luz por los medios transparentes.** — No se conoce sustancia ninguna de transparencia perfecta. El vidrio, el agua, hasta el aire, apagan gradualmente la luz que los atraviesa. Obsérvase en efecto que gran número de estrellas invisibles desde las llanuras aun cuando está muy claro el cielo, se hacen visibles desde las altas montañas.

Esta pérdida gradual que sufre la luz el atravesar los medios diáfanos, se *llama absorción*. Si todos los rayos simples fueran igualmente transmisibles á través de los cuerpos diáfanos, éstos serían incoloros. Pero nunca ocurre así : los cuerpos diáfanos dejan pasar ciertos rayos luminosos más fácilmente que

otros. Entonces el medio toma el color de los rayos para que es más diáfano. Por esta razón parece *azul* el aire en grandes masas, *verde* una gruesa lámina de vidrio; el vidrio teñido de *rojo* por el protóxido de cobre no deja pasar sino los rayos *rojos*, y absorbe todos los demás, aun en gruesos pequeños.

La coloración de algunos medios transparentes varía con su grueso. Por ejemplo, el percloruro de cromo, que es verde en masas pequeñas, se vuelve rojo oscuro al aumentar de grueso. Se da el nombre de *policroicas* á las sustancias cuyo tono varía con la masa.

RAYAS DEL ESPECTRO Y ANÁLISIS ESPECTRAL.

423. Rayas del espectro. — 1°. *Definición y producción.* — Cuando se obtiene un espectro solar muy puro (regla de Newton), se ve que no es continuo; sino que lo surcan perpendicularmente en el sentido de su longitud *rayas oscuras*, llamadas *rayas del espectro solar*.

Para observarlas bien, se recibe un haz de luz del sol en un cuarto oscuro, por una hendidura muy estrecha y á la distancia de 3 á 4 metros se mira esta hendidura á través de un prisma de flint exento de estrías, manteniendo las aristas paralelas á los bordes de la hendidura: entonces se observa gran número de rayas oscuras, muy finas, paralelas á las aristas del prisma y colocadas á distancias muy desiguales. Se las ve mejor aún mirando con un anteojo.

2°. *Historia y descripción.* — Es extraño que Newton no distinguiera estas rayas; probablemente la materia de sus prismas no era muy pura. Wóllanston fué el primero que las notó en 1802; pero á Fraunhofer se debe el conocimiento exacto de ellas; este físico publicó en 1815 una descripción detallada con un dibujo exacto de 0,394 m. de largo, y que contenía 354 rayas. Las más aparentes eran designadas por las letras A, *a*, B, C, D, E, *b*, F, G, H; ordinariamente se les da el nombre de *rayas de Fraunhofer*. La raya A (fig. 1, pl. I y II) está en el límite del rojo; B en el centro de este color; C en el límite del rojo y del anaranjado; D en el amarillo; E en el verde; F en el azul; G en el índigo y H en el violado. También hay otras rayas notables, como *a* en el rojo y *b* en el verde. Con la luz solar tienen estas rayas posiciones fijas en las diferentes regiones del espectro, lo que proporciona medio de medir con exactitud los índices de refracción de los colores correspondientes.

De Fraunhofer acá se han hecho numerosos trabajos sobre el mismo asunto, publicándose dibujos más completos de las rayas del espectro solar. Pueden citarse:

El dibujo de	S. Brewster,	de 1,727 m	de longitud	que contenía	2000 rayas.
—	Kirchow,	— 1,25 m	—	—	3000 (y más).
—	Angstrom	— 2,90 m	—	—	1000 —
—	Thollon,	— 15 m	—	—	4000 —

424. Espectroscopios. — I. *Definición.* — Todo aparato que sirve para estudiar el espectro es un espectroscopio. La disposición que sirvió á Fraunhofer fué el primer modelo y el tipo de estos instru-

mentos. Estaba formado: 1°. de una hendidura hecha en la ventana de un cuarto oscuro, por donde penetraban los rayos solares; 2°. de un prisma que descomponía la luz solar; y 3°. de un anteojo para observar el espectro. La necesidad de obtener rayos incidentes casi paralelos exigía que se colocara el prisma á distancia bastante grande, unos 10 metros próximamente de la hendidura. Este espectroscopio primitivo era, pues, de uso poco cómodo. El objeto de la construcción de los propiamente dichos fué obtener los mismos resultados.

II. *Descripción esquemática.* — Todo espectroscopio se compone esencialmente de cuatro partes.

1°. Un *sistema dispersivo* P, simple ó compuesto, formado por uno ó varios prismas convenientemente dispuestos para que sus efectos puedan sumarse (fig. 429).

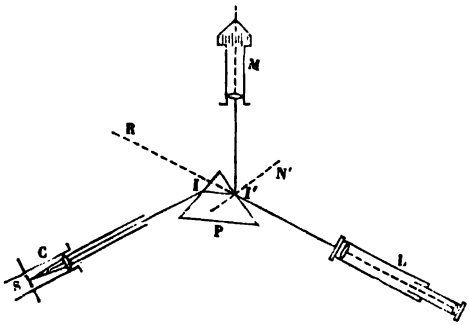


Fig. 429.

2°. Un *colimador* C, órgano destinado á dirigir sobre el prisma un haz de rayos paralelos. Compónese de una lente y de una hendidura que se encuentran en un mismo tubo de anteojo. La hendidura puede ser iluminada por el foco de luz cualquiera que se trata de analizar. Está situada en el foco principal de la lente, de modo que el haz divergente que sobre ésta dirige emerge paralelamente el eje principal, el cual coincide con el eje geométrico del tubo.

3°. Un *anteojo* L, cuyo eje óptico está dirigido de manera que reciba los rayos emergentes del prisma. Este anteojo es de pequeño aumento y tiene, por tanto, *campo* muy extenso. Si el *colimador* ha sido arreglado de modo conveniente, el haz blanco que sale de él es enteramente paralelo; del mismo modo, los haces de color que emergen del sistema refringente son paralelos todos á una misma dirección, sea cual fuere la dispersión. De manera que cada haz puede ser recibido sucesivamente en el anteojo, paralelamente al eje principal é ir á formar una imagen coloreada en el foco del objetivo: esta imagen es lo que se examina por medio del *ocular*[1].

4°. Un *micrómetro* M, que viene á ser una especie de segundo colimador, con un *micrómetro* en su foco, quiere decir con una escala graduada de divisiones muy finas y equidistantes, fotografiadas en vidrio. Cuando este objeto se encuentra bien iluminado, dirige sobre la lente haces divergentes que salen de él paralelamente al eje,

1. Hemos visto precedentemente que si se afoca el anteojo sobre uno cualquiera de los focos coloreados del prisma, también está afocado para todos los demás (390, 3°), con tal de que se le coloque en el mínimum de desviación.

yendo después á reflejarse en l', sobre la cara de emergencia del prisma, y entran en el anteojo paralelos al eje óptico. Así es que se ve al mismo tiempo, en una misma dirección LR, la imagen del espectro y la de la escala graduada : las cosas se arreglan de modo que ésta venga á proyectarse algo por encima de aquélla.

425. **Espectroscopio ordinario.** — Las cuatro piezas del instru-

Fig. 430.

mento (fig. 430) están montadas en un pie común, y los ejes de los tres tubos convergen hacia las caras del prisma de flint P. El anteojo A es el único que puede girar en torno del prisma. Se le sujeta en la posición que acaba de dársele por medio de un tornillo de presión *n*. El botón *m* sirve para *afocar*, esto es para adelantar ó hacer retroceder el ocular hasta que se vea claramente la imagen del espectro; por fin, el botón *s* proporciona medios de inclinar más ó menos el anteojo. La luz que se trata de analizar está en G, colocada delante de la hendidura del colimador, que se encuentra en el tubo B.

Fig. 431.

El micrómetro, dispuesto en el tubo C, es iluminado por una bujía F.

La hendidura es vertical y estrecha : se la abre más ó menos poniendo más ó menos en movimiento con un tornillo de presión *v* la pieza *a*, que es móvil (fig. 431). Pueden observarse simultáneamente dos espectros colocando en la parte superior de la hendidura un pequeño prisma *i* de reflexión total, que rechaza en la dirección del eje del colimador los rayos procedentes de la llama auxiliar.

426. **Espectroscopios de visión directa.** — Éstos son unos aparatos en que el anteojo, en vez de estar más ó menos inclinado sobre la dirección del colimador, se encuentra exactamente *en su prolongación* : de ahí resulta que el espectroscopio entero parece un simple anteojo.

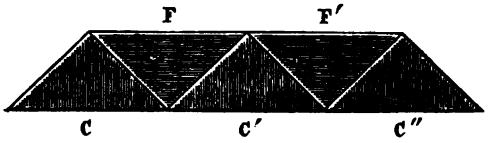


Fig. 432.

I. *Espectroscopio de Amici.* — Se funda en el principio inverso del acromatismo, á saber, que se puede anular la *desviación* sin destruir la *dispersión*. Amici usaba un *prisma múltiple*, compuesto de uno de flint entre dos de crown. Hoffmann construyó un prisma múltiple compuesto de cinco parciales (fig. 432) : F y F′ son de flint; C, C′, C″ son de crown.

II. *Espectroscopio de Thollón.* — La solución de Thollón se funda en un principio completamente distinto. Su *espectroscopio de visión directa* está constituido por una combinación de prismas que, si bien imprimen al rayo incidente una dispersión progresiva, lo vuelven á su dirección de incidencia. Este es un instrumento de precisión y poder incomparables; así es que puede dar un espectro solar de 185°, que tiene una longitud aparente de 15 *metros*, donde se distinguen claramente más de 4000 *rayas oscuras*.

En el intervalo de la doble raya D se ven *claramente* otras 12, de las cuales 3 son metálicas y 9 producidas por nuestra atmósfera.

Por fin, Thollón ha podido, gracias al movimiento de las rayas metálicas, no sólo *probar* el movimiento de rotación del sol, sino también calcularlo con cierta exactitud.

427. **Aplicaciones del espectroscopio. — Análisis espectral.** — Después de Fraunhofer varios físicos continuaron con este precioso instrumento el estudio del espectro para toda clase de manantiales de luz conocidos, tanto naturales como artificiales.

1°. *Espectros continuos.* — Si se usa un espectroscopio de ancha hendidura para observar la luz del día, ó bien uno de hendidura estrecha para estudiar líquidos ó sólidos incandescentes, se tendrá un espectro *continuo*, quiere decir *sin rayas oscuras*.

2°. *Espectros de los vapores metálicos.* — Ya en 1815 observó Fraunhofer que los expectros de las chispas eléctricas estaban surcados por rayas *brillantes*.

Varios observadores y entre otros Fox Talbot (1826), notaron que las *rayas brillantes* son características de los *metales*.

Por fin, en 1860 fundaron Kirchhoff y Bunsen el método de *análisis espectroscópico* ó *análisis espectral*. Consiste en observar con el espectroscopio la llama de un mechero de Bunsen, muy pálida de por

sí, que se ilumina y se colora cuando se introduce en ella una sal metálica. Entonces se observa en el espectro correspondiente la presencia de número más ó menos grande de rayas coloreadas *brillantes*, situadas siempre en el mismo punto y características del metal introducido.

Las sales metálicas más á propósito para estas experiencias son las fácilmente volatilizables, como los cloruros. Cuando no se tiene á mano uno de éstos, se introduce la lámina metálica en ácido clorhídrico; fórmase el cloruro en su superficie y entonces se la coloca en la llama. Algunas veces se recurre, no á mecheros de Bunsen, sino á descargas eléctricas á través de los metales; en otros casos también se hace pasar la descarga entre un metal y un líquido.

428. **Principales descubrimientos del análisis espectral.** — La plancha de colores I representa los espectros de varios metales. La figura 1 es el espectro solar, que sirve de punto de referencia para colocar las rayas metálicas.

La figura 2 representa el espectro del sodio (*Natrium*), espectro que no contiene rojo ni anaranjado, ni verde, ni azul, ni violado; caracterizalo una raya *doble amarilla* muy brillante, que ocupa exactamente el lugar de la raya D (de Fraunhofer). El sodio es el metal que posee mayor sensibilidad espectral. Se ha observado efectivamente que $\frac{1}{3000000000}$ gramo de este cuerpo basta para que surja la raya amarilla característica. Así es que casi no hay manera de evitarla. Basta un poco de polvo producido en el gabinete para que se origine, lo cual prueba cuánto abunda el sodio en la naturaleza.

La figura 3 es el espectro del potasio (*Kallium*) caracterizado por dos rayas brillantes, una en el *extremo rojo*, y correspondiente á la raya Fraunhofer y la otra en la *extremidad violada*.

El espectro 4 es el del litio : *dos* rayas principales, una amarilla de escaso brillo, otra *roja* y brillante

El calcio (5) da una raya *verde*, muy viva, una *anaranjada* y una *azul*.

El estroncio (strontium) (6), produce ocho rayas, seis *rojas*, una *anaranjada*, una *azul*.

El bario (7) da dos rayas principales *verdes* y otras en el amarillo y el azul.

El casio y el rubidio son metales relativamente nuevos, descubiertos por Kirchhoff y Bunsen por medio del análisis espectral. El primero se distingue por dos rayas *azules*, el segundo por dos *encarnadas* muy brillantes, y por dos *violadas* menos intensas. Un tercer metal, el talio, fue descubierto gracias á este medio por Crookes, físico inglés, y por Lamy, físico francés, al mismo tiempo. El talio está caracterizado por una raya *verde* única.

El indio, caracterizado por una raya *indigo*, ha sido descubierto recientemente. Por fin, en 1876, Lecoq de Boisbaudran descubrió el galio, metal que se distingue por dos rayas *violadas*.

Observaciones. — 1°. El análisis espectral se aplica muy bien á todos los metales alcalinos. Con los de las otras secciones, las experiencias son más difíciles. Como estos últimos no se evaporan sino á temperaturas muy elevadas, hay que recurrir á un foco de calor más intenso que el obtenido con la lámpara de Bunsen. Entonces se recurre á la chispa eléctrica ó el arco voltaico. Así se obtienen espectros perfectamente determinados; pero aquí el método se hace complejo por el gran número de rayas brillantes que se obtienen. Concíbese que esta multiplicidad de rayas haga difícil distinguir unos de otros ciertos metales.

2°. El espectro de los metales depende de su temperatura; de modo que varía según el modo como se le produce. Así, con cierto grado de calor el sodio no da más que la raya D; á temperatura más elevada se agregan á esa otras.

3°. La plancha de colores II representa los espectros de los principales metaloides.

429. **Resumen de espectroscopia. — Espectros de diversos órdenes.** — I. *Espectros de los gases.* — Los descubrió Plucker en 1856. Su método consiste en el método

de pequeños tubos capilares ensanchados en sus extremidades y que pueden ser atravesados por una descarga eléctrica. Obtiénese un rasgo de fuego más á menos subido de color, que da un espectro (fig. 435). Este espectro puede ser de dos clases diferentes;

1°. Espectro de *primera clase* ó *acanalado*, observado en el ázoe ó nitrógeno;

2°. Espectro de *segunda clase*, de *rayas brillantes*, observado en el hidrógeno.

El primero puede convertirse en espectro de segundo orden, según la naturaleza de la descarga: por ejemplo, en el nitrógeno, cuando se hace pasar la descarga á través de una botella de Leyden, se obtiene un espectro de segunda clase.

Fig. 433.

También dependen estos espectros de la presión: así, Plucker no observó sino una raya brillante en el hidrógeno y Vülner encontró cuatro.

II. *Espectros eléctricos.* — Estos espectros dependen de la naturaleza de los eléctrodos, de la de los medios y descarga. Hay cuatro modos de descarga: la chispa, el penacho, el resplandor y la descarga oscura.

La chispa produce espectros de segunda clase; el penacho y el resplandor, espectros de primera.

III. *Espectros de absorción.* — Cuando se hace pasar la luz á través de vidrios de colores antes de descomponerla por medio del prisma, produce espectros brillantes pero *surcados de bandas oscuras*: estos son *espectros de absorción*. El vidrio más curioso en este punto es el *de cobalto*.

También se puede producir la absorción con ayuda de líquidos de colores. Así, las disoluciones de sal de didimo dan un espectro *surcado por varias rayas negras*.

Otro espectro de absorción muy curioso es el que suministran los gases coloreados, especialmente los *vapores nitrosos* (ó *ácido hiponítrico*) perfectamente secos. Obsérvase un espectro que se llena de ranuras; éstas empiezan en el violado y acaban extendiéndose hasta el rojo.

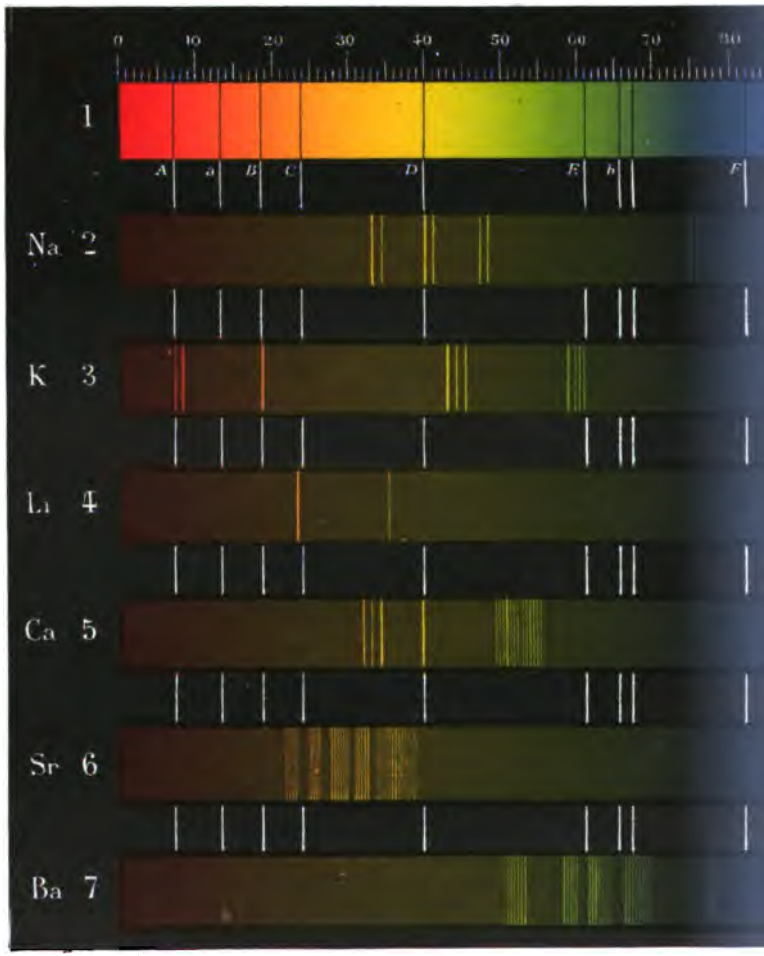
IV. *Rayas telúricas.* — Brewster observó ya en 1833 que el espectro solar no es el mismo á toda hora del día. Así por ejemplo, al caer la tarde, y sobre todo si está brumoso el cielo, no se observan las mismas bandas que al mediodía y con un cielo claro. De aquí dedujo la existencia de *bandas* especiales de *absorción* debidas á la atmósfera terrestre. Estas son las *rayas telúricas*.

Experiencias de Janssen. — Janssen repitió estas experiencias (1862) con un poderoso espectroscopio que le permitió resolver en rayas muy finas las bandas observadas por Brewster. Obtuvo hasta 3000 rayas. Hizo una experiencia directa mirando el espectro solar á través de un tubo de vapor de agua de 37 metros. De este modo observó que el vapor de agua, visto en grandes masas, parece *anaranjado*, como el sol poniente.

V. *Espectros invertidos.* — Ya en 1815 notó Fraunhofer que la raya brillante del alcohol salado coincide exactamente con la raya negra en D, sobre el amarillo, cuando se sobrepone al espectro solar uno eléctrico; pero no sacó de este hecho consecuencia ninguna.

Kirchhoff efectuó la misma observación y la generalizó. Hizo pasar un espectro solar á través del vapor de sodio y vió la raya negra D. Pero la raya del vapor de sodio es de ordinario brillante: cuando aparece negra, se dice que está *invertida*. También notó el hecho con la raya roja del litio. Cada vez que se mira un espectro solar continuo á través de un vapor que sólo da rayas brillantes, estas mismas rayas aparecen *oscuras*. Entonces se dice que el espectro del vapor está *invertido*.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY



Imp. Monrocq, à Paris.

ESPECTROS DE

1. Espectro
2 Espectro del Sodio.
3. ——— del Potasio.
4. ——— del Litio.

Plancha 1.

Ch. BOURET, Paris.

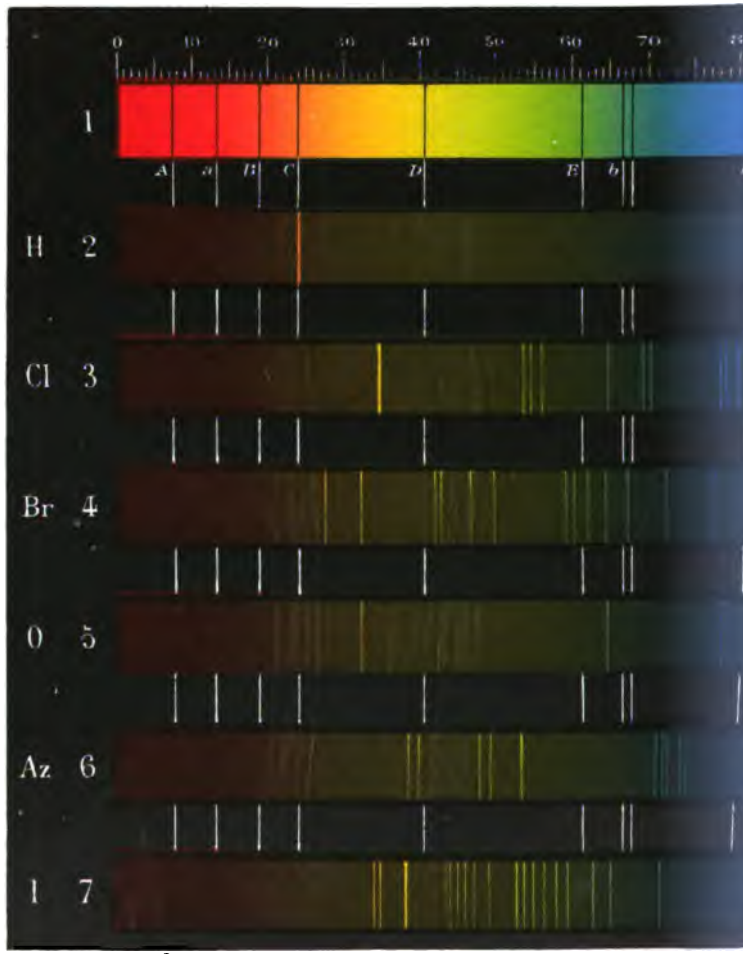
E LOS METALES.

ro del Sol

5. Espectro del Calcio.
6 —— del Estroncio.
7 —— del Bario.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

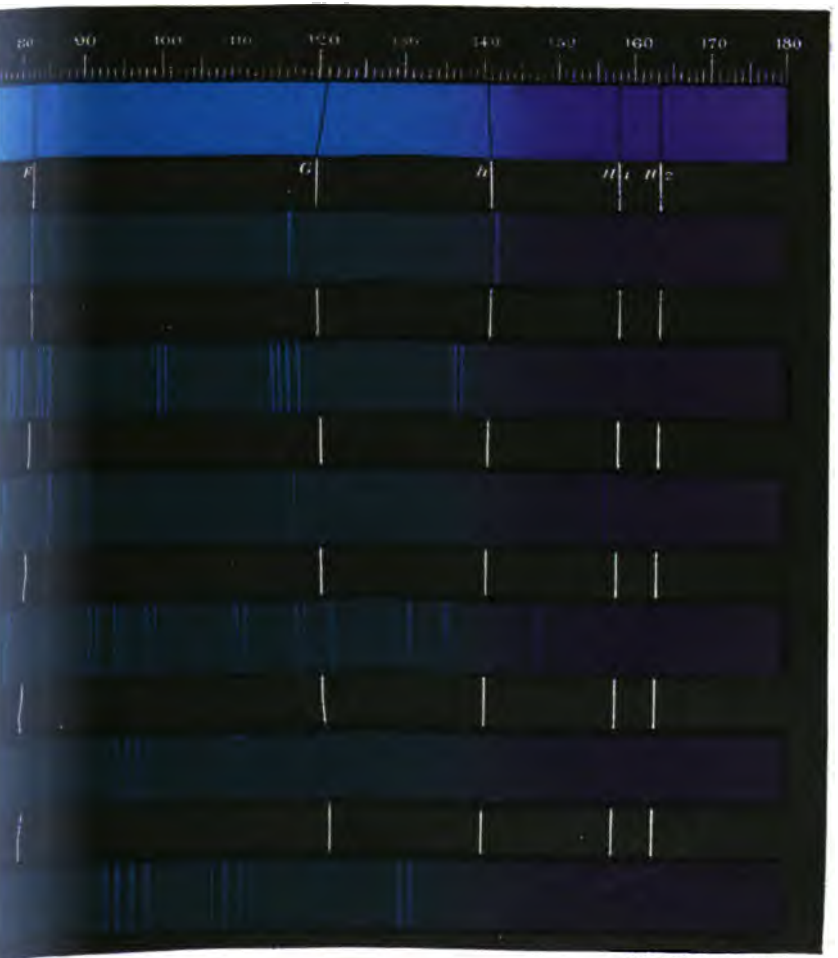
LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA



Imp. Monrocq, a Paris.

ESPECTRO DE

1. Espect
2. Espectro del Hidrógeno
3. ——— del Cloro.
4. ——— del Bromo.



Ch. BOURET, Paris

E LOS METALOIDES.

ectro del Sol

geno. | 5. Espectro del Oxígeno.
6. ——— del Ázoe ó Nitrógeno
7. ——— del Iodo.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

Si se mira un alambre de platino incandescente con el espectroscopio, se tendrá un espectro continuo. Si entre el alambre continuo y el espectro se interpone la llama del alcohol salado, se verá una raya negra D en el mismo punto donde se vería una raya amarilla.

Conclusión. — Las rayas oscuras de los *espectros de absorción* se deben á la absorción de ciertas radiaciones luminosas por los vapores metálicos que si fueran más calientes, emitirían estas mismas radiaciones, en forma de rayas brillantes.

VI. *Constitución de los astros.* — De estos hechos resulta un nuevo género de estudios : el de la constitución de los astros. El espectro solar presenta una raya negra en D : luego la atmósfera solar contiene sodio; análogamente, las rayas que corresponden á los metales conocidos indican su presencia en la atmósfera solar. Así, gran número de rayas brillantes del hierro coinciden exactamente con rayas oscuras del espectro solar : luego en el Sol hay vapores de hierro. Los metales cuya presencia en el astro central de nuestro sistema parece cierta son el hierro, el calcio, el magnesio, el sodio, el cromo, el nickel, el manganeso y el hidrógeno, y probablemente el bario, el cadmio y el zinc.

La Luna produce el mismo espectro que el Sol, probando así que sólo emite luz reflejada. Otro tanto ocurre con los planetas, con diferencia de escaso número de rayas debidas á sus atmósferas.

Las estrellas dan rayas características, en general negras, pocas veces brillantes. De modo que son luminosas por sí mismas, como el Sol.

Las nebulosas producen espectros de rayas brillantes, como los gases; otro tanto pasa con los cometas.

CAPÍTULO V

INSTRUMENTOS DE ÓPTICA.

MICROSCOPIOS. — INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS. APARATOS DE PROYECCIÓN.

430. **Vidrio de aumento, lente ó microscopio simple.** — El *vidrio de aumento* ó *microscopio simple* es un instrumento destinado á producir imágenes virtuales y amplificadas de los objetos pequeños, cuyos pormenores escaparían á la simple vista.

Está formado sencillamente por un *ocular* convergente, quiere decir, por una lente convergente que se coloca delante de la vista para mirar los objetos pequeños. La lente es de *foco corto*, y los objetos se ponen por la parte del foco principal más cercana al aparato.

Marcha de los rayos. — Sea el objeto AB (fig. 434), que se quiere observar: la imagen se construirá aplicando la regla general (363) á este caso particular. Para ello se trazan primero los ejes secundarios AO y BO, y después rayos paralelos al eje, que son refractados de modo que pasen por el foco principal, al otro lado de la lente : sus prolongaciones van á cortar los ejes secundarios en puntos A' y B', que son los focos virtuales de los puntos A y B. Tiénese, pues, en A'B' la imagen *virtual, recta y amplificada* del objeto AB.

Afocamiento. — Para que la imagen de los objetos presente gran pureza á la vez que el máximum de amplificación, no basta que dichos objetos estén bien iluminados, sino que además se necesita

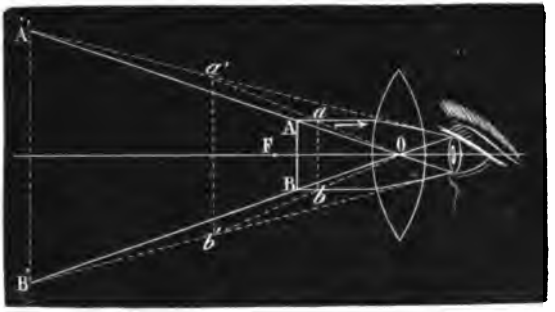


Fig. 434.

que la imagen se forme á una distancia determinada (para cada ojo), y fuera de la cual ya no ve claramente; esa se llama *distancia mínimum de la visión distinta ;* tratándose de una persona de vista normal, se encuentra comprendida entre 25 y 30 centímetros.

Cada observador debe *afocar* para su vista. Esto se obtiene modificando *muy poco* la distancia de la lente al objeto, pues un pequeño movimiento de éste imprime uno muy grande á la imagen.

Diámetro aparente. — Llámase *magnitud aparente* ó *diámetro aparente* de un objeto AB, al ángulo bajo el cual se le ve, es decir,

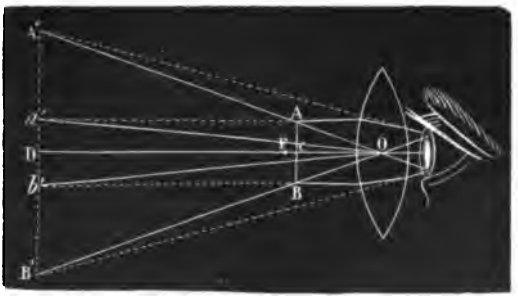


Fig. 435.

el ángulo AOB (fig. 435), formado por dos rayos visuales trazados desde el centro de la pupila hasta las dos extremidades de una misma dimensión del objeto.

Aumento. — Se llama aumento á la *relación del diámetro aparente de la imagen con el del objeto,* supuestos ambos á la distancia mínimum de la visión distinta.

Sean AB el objeto y A'B' su imagen (fig. 435); proyectemos AB sobre A'B' en $a'b'$. Llamando G al aumento, se tiene por definición,

$$G = \frac{A'OB'}{a'Ob} = \frac{A'B'}{a'b'} = \frac{A'B'}{AB};$$

luego *el aumento es igual á la relación de la magnitud de la imagen con la del objeto.*

De los dos triángulos semejantes A'OB' y AOB resulta

$$G = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC} = \frac{p'}{p},$$

y de la ecuación de las lentes convergentes (caso de una imagen virtual) se deduce

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad \text{de donde} \quad \frac{p'}{p} = 1 + \frac{p'}{f}.$$

Reemplazando $\frac{p'}{p}$ por G y p' por δ, se tiene $G = 1 + \frac{\delta}{f}$. Finalmente, despreciando 1 con relación á $\frac{\delta}{f}$, resulta $G = \frac{\delta}{f}$, que es la fórmula normal del aumento en la lente. Esta fórmula prueba que el aumento es tanto mayor: 1°. cuanto *de más corto foco*, es decir, *cuanto más convergente* es la lente; 2°. cuanto mayor es la distancia mínimum de la vista distinta del observador.

Observaciones. — 1°. El aumento que acabamos de considerar es el aumento en diámetro ó *aumento lineal*. El *superficial* equivale al cuadrado del anterior.

2°. Lentes de repuesto permiten hacer variar el aumento; pero dentro de ciertos límites, si se quiere conservar su pureza á la imagen: el microscopio simple da imágenes todavía muy claras con un aumento lineal igual á 120.

431. *Corrección de las aberraciones. — Dobletes.* — Las aberraciones de refrangibilidad y de esfericidad son tanto mayores en el microscopio simple cuanto más aumenta éste el tamaño aparente de los objetos. Ya se ha visto (420) que la aberración de refrangibilidad se corrige por medio de lentes acromáticas, y la de esfericidad con diafragmas que sólo dejan pasar los rayos cercanos al eje (ó *rayos centrales*) en los que es despreciable la aberración de esfericidad.

Fig. 436.

Fig. 437.

También se corrige ésta usando dos pequeñas lentes plano-convexas superpuestas, cuyas caras planas miran al objeto (fig. 437). Estas lentes se encuentran dispuestas en *ojete* representado en tamaño natural (perspectiva y sección) en las figuras 436 y 437. Aunque cada una de ellas sea menos convexa que la lente simple que reemplazan, su sistema tiene el mismo aumento; pero la aberración es menor, porque la primera

lente tiene como efecto acercar previamente al eje los rayos que inciden sobre la segunda. Este sistema de lentes recibe el nombre de *doblete de Wóllanston.*

432. **Microscopio simple.** — Este nombre se reserva en particular al vidrio de aumento, cuando está provisto de una armadura destinada á hacer más fácil su empleo. En un montante horizontal E (fig. 438), que puede subirse ó bajarse por medio de una barra dentada y de un piñón de botón D, está dispuesto un *ojete* negro *m*, que mantiene una lente de mayor ó menor aumento. Debajo se halla el *porta-objeto*, que es fijo, y donde se coloca el objeto entre dos láminas de vidrio *b;* la luz difusa de la atmósfera se recibe en un espejo cóncavo M, inclinado de manera conveniente para lanzar sobre el objeto un haz de rayos convergentes. Se coloca la vista muy cerca de la lente, y se sube ó se baja por medio del botón D hasta afocar.

Fig. 438.

433. **Microscopio compuesto.** — El *microscopio compuesto* es un instrumento de óptica que sirve, como el sencillo, para facilitar la visión de objetos muy pequeños, reemplazándolos por una imagen virtual, invertida y muy aumentada.

Reduciéndolo á su mayor grado de sencillez, el instrumento está formado por dos vidrios convergentes, uno de corto foco, llamado *objetivo* porque está hacia el lado del objeto; y otro menos convergente, que se denomina *ocular*, porque está junto á la vista del observador. Estos dos vidrios se colocan en un mismo tubo, de tal manera que sus ejes coincidan.

Marcha de los rayos. — Si un objeto AB se encuentra muy cerca y algo más allá del foco principal F del objetivo M, entonces va á formarse al otro lado del objetivo, mucho más lejos que el segundo foco principal F', (fig. 439) una imagen aérea *ab*, real, invertida y aumentada. Pero se procura que la distancia del vidrio M al objeto sea tal que la imagen *ab* caiga entre el ocular N y su foco F''. De ahí resulta que este último vidrio produce el efecto de una lente, y sustituye la imagen *ab* por otra *a'b'*, virtual, más aumentada todavía, recta relativamente á la primera, y en consecuencia invertida respecto del objeto.

Aumento. — El aumento se define de la misma manera que antes (430). Es fácil demostrar que el *aumento total* es igual al *producto del aumento del objetivo por el del ocular.*

Efectivamente, el aumento del objetivo (fig. 439) es $\frac{ab}{AB}$ y el del ocular $\frac{a'b'}{ab}$. Ahora bien, el producto de estos dos cocientes es $\frac{a'b'}{AB}$, que es en efecto el aumento total. De consiguiente, se le podría calcular

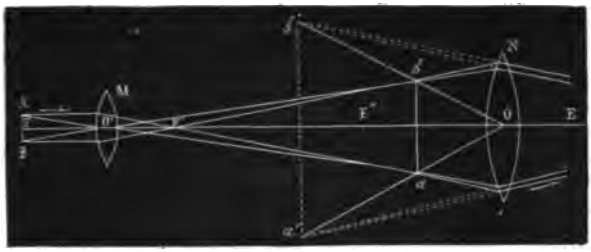


Fig. 439.

en función de las distancias focales del objetivo y del ocular, y de las distancias del objeto y de su imagen á estos dos vidrios; pero en general se le determina directamente por la experiencia.

434. **Medida experimental del aumento.** — *Cámara lúcida de Nachet.* — Para esto se utilizan un *micrómetro* y una *cámara lúcida.*

La *cámara lúcida* consiste en un vidrio de *reflexión total.* La de Nachet es un prisma doble de crown *abc*, truncado en *c* (fig. 441), que está colocado en una armadura de cobre cuyas caras superior é inferior se taladran. De esta manera se puede colocar el prisma encima del ocular del microscopio (fig. 440). Si se dispone cerca del instrumento una hoja de papel P, cualquier objeto que des-

Fig. 440.

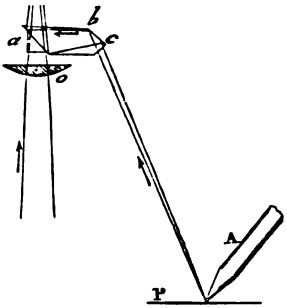


Fig. 441.

canse en ella, por ejemplo la punta de un lápiz, envía al prisma un haz de luz que penetra en él normalmente á la cara *c* (fig. 441), sufre una primera reflexión total en *bc*, una segunda en la cara *a*, y desde allí llega á la vista como si saliera del microscopio. En *a* se encuentra un pequeño prisma rectángulo que se adapta al primer prisma pegándolo

con bálsamo del Canadá, líquido transparente y cuyo índice de reflexión supera apenas al del crown; gracias á este prisma adicional, los rayos que emergen del ocular *o* atraviesan de esta manera una lámina delgada de caras paralelas, y llegan á la vista sin desviación. Así pues, el observador ve simultáneamente en el campo del microscopio el lápiz y la imagen de los objetos que se trata de observar. Si es preciso, puede seguir con el lápiz los contornos de aquélla.

Operación. — Colócase en el porta-objeto un micrómetro, dividido en *centésimos de milímetro* por ejemplo; después y por medio de la cámara lúcida se proyecta sobre la imagen de las divisiones del micrómetro la de una escala en milímetros hecha en papel blanco. Supongamos que 10 divisiones del micrómetro cubran 120 milímetros de la escala; de ahí se deduce que la imagen de una sola división del micrómetro tiene una magnitud de 12 milímetros; ahora bien, la magnitud absoluta del objeto es $\frac{1}{100}$ de milímetro : luego el aumento es igual á 1200.

Recíprocamente, una vez conocido el aumento, se deduce de él la magnitud real de los objetos dividiendo la magnitud de la imagen, obtenida con la cámara lúcida, por el aumento.

435. **Descripción del microscopio Nachet.** — 1°. *Cuerpo del instrumento.* — Compónese de un sistema de tres tubos de cobre DD', I y H (fig. 442), el primero de los cuales sostiene el objetivo o, y el último, H, el ocular O. El tercer tubo I es una alargadera que puede deslizarse con frotamiento suave en el tubo DD', el cual puede correrse también y con frotamiento suave, en un tubo más grueso, mantenido por una abrazadera E. Este último se fija en un montante BB', que por medio de un tornillo de paso muy pequeño, á que da vueltas el botón T, se sube ó se baja, en la distancia de 6 milímetros, á lo largo de un vástago interior (no visible en la figura). Con el montante BB' sube ó baja todo el cuerpo del microscopio, lo cual permite acercarlo ó alejarlo según se quiera del objeto que se observa. Por fin, la pieza BB' y todas las demás del instrumento están sostenidas por un eje horizontal A, alrededor del que giran con frotamiento bastante duro para que sea posible al mismo tiempo moverlas y mantenerlas fijas en todas las posiciones, desde la vertical hasta la horizontal.

2°. *Porta-objeto.* — Los objetos que se trata de observar se colocan en una plataforma R, que es el *porta-objeto*, entre dos láminas de vidrio V. El porta-objeto presenta en su punto medio un agujero que permite el paso de la luz enviada por un reflector M.

3°. y 4°. *Reflector y diafragma.* — Este reflector es un espejo cóncavo de vidrio montado sobre vástagos articulados, para que sea posible darle todas los posiciones é inclinaciones, concentrando así sobre el objeto la luz difusa de la atmósfera ó de cualquier foco luminífero (fig. 443). Entre el reflector M y el porta-objeto está un diafragma K, agujereado en su contorno por cuatro taladros desiguales, y que gira libremente alrededor de un eje, de manera que sea posible llenar á voluntad cada uno de los agujeros debajo de la abertura central del porta-objeto, y regular así la cantidad de luz que llega al objeto. También se obtiene este resultado subiendo ó bajando, por medio de una palanca *n*, el diafragma K, que es móvil en una corredera. Además, sobre el diafragma K hay una pieza *m* donde se dispone á voluntad, sea un segundo diafragma con un pequeño agujero y que sólo deja llegar al objeto muy poca luz, sea una lente convergente, que concentra la luz en el objeto, sea un prisma X de *doble reflexión total.*

Los objetos observados son en general bastante transparentes para que sea

posible iluminarlos por debajo; en el caso de que no lo permita su opacidad, se les alumbra por encima, valiéndose de una lente convergente, montada en un pie de articulaciones; colócasela de manera que la luz difusa de la atmósfera se concentre sobre el objeto.

5ª. *Armadura del porta-objeto.* — Por fin, el porta objeto R y el montante BB' no están montados directamente en el eje A, sino en un platillo adaptado á dicho eje por encima del porta-objeto. Este platillo es lo que se representa *en color negro* en el centro del porta objeto R (fig. 442). Este último da vueltas alrededor

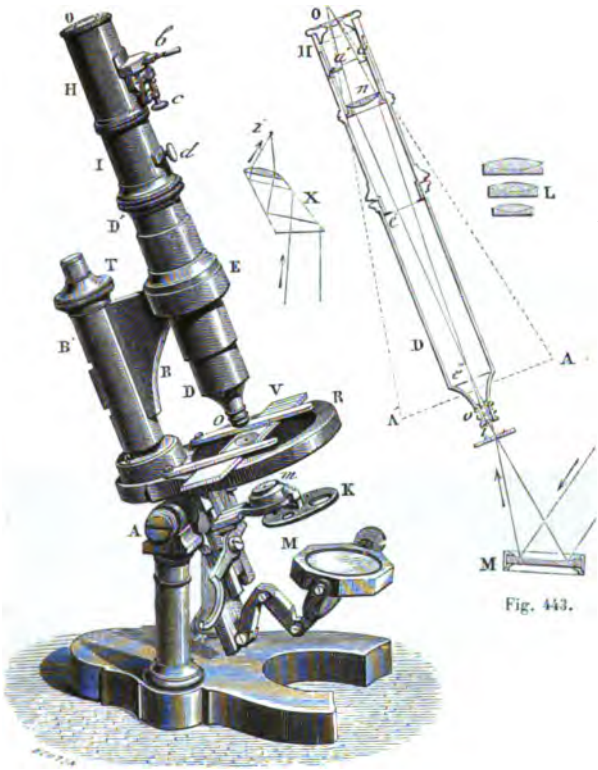


Fig. 443.

Fig. 442.

del platillo, siguiendo una ranura circular donde se mantiene. De esta disposición resulta que cogiendo el montante BB' con la mano, se puede hacerle dar vueltas, así como al porta-objeto y al cuerpo del microscopio, en torno del eje óptico del mismo. Durante este movimiento, el reflector y los diafragmas no andan; pero como las láminas de vidrio V giran con la plataforma R, el objeto es iluminado sucesivamente por todas sus caras.

6ª. *Objetivo compuesto.* — El objetivo *o* (fig. 443) está compuesto de tres pequeñas lentes acromáticas convergentes (dibujadas aparte en L). Los efectos de estas tres lentes se suman, y su sistema actúa como una lente única cuyo *poder convergente* fuera igual á la suma de los poderes convergentes de las lentes simples. El objeto está colocado en *i*, muy cerca, pero más allá del foco principal del objetivo.

7°. *Ocular compuesto* (*ocular negativo ó de Huygens*). — Los rayos que emergen del objetivo van á incidir, antes de formar su imagen, en una cuarta lente convergente *n*, que los hace más convergentes todavía. Entonces forman una imagen real y aumentada del objeto *i* en *aa'*, algo más lejos del foco principal del quinto vidrio convergente O. En consecuencia, si se mira á través de éste, obra como lente y da en AA' una imagen virtual y muy aumentada de la imagen *aa'* y, por tanto, del objeto. Los dos vidrios *n* y O constituyen un *ocular negativo* (436), llamado también *ocular de Huygens* [1].

Observación. — Debe haber siempre objetivos y oculares de repuesto, cuyos vidrios más ó menos convergentes, hacen variar el aumento. En el microscopio que acabamos de describir, el aumento superficial puede llegar á 1300.

436. **Acromatismo del microscopio.** — En un microscopio compuesto que se redujera á dos lentes (según se ha supuesto en la figura 439) se producirían aberraciones de esfericidad y de refrangibilidad tanto mayores cuanto más aumentase el microscopio las dimensiones de los objetos. Para corregir estas aberraciones se recurre á un objetivo y á un ocular *compuestos*. Se ha visto que el primero está constituído por tres pequeñas lentes acromáticas. Cuanto al *ocular negativo*, encuéntrase formado por dos lentes *n* y O, dispuestas de modo que contribuyen al acromatismo del instrumento.

Acromatización por el ocular negativo. — En efecto, sean *ab* el objeto, O' el objetivo y *o* uno de los vidrios del ocular negativo (fig. 444). Supongamos que el vidrio *n* no se halle aún interpuesto entre O y O'. Como los rayos *blancos* emitidos por el punto se dispersan á su paso á través del objetivo, sus radiaciones *rojas* van á formar un foco *rojo* en R, sobre el eje secundario de *b*, mientras que

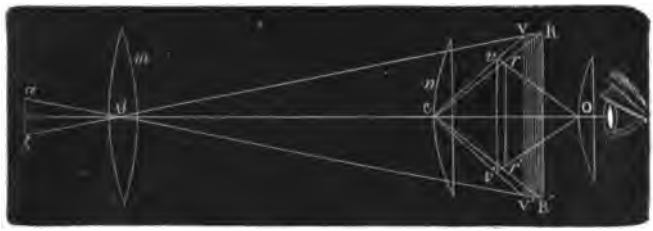


Fig. 444.

los rayos violados, más refrangibles, van á reunirse en V, más cerca de la lente; análogamente, los restantes haces forman sus focos entre R y V; lo mismo ocurre, de V' á R' para los rayos que salen de *a*. Si se miran ahora á través del ocular *o* las siete zonas coloreadas VV'RR', los colores se sobreponen en la parte central y ésta parece blanca, mientras que los bordes están teñidos de rojo y de anaranjado; de ahí procede la *irisación* de la imagen.

1. El vidrio *n* se llama sea *vidrio de campo* (porque aumenta el *campo* (437) del instrumento), sea *lente colectora* (porque reune los rayos en dirección del eje), ó bien aun *vidrio de Campani*.

También se fabrican oculares llamados *positivos* ó de *Ramsden*, compuestos de dos vidrios *plano-convexos* cuyas convexidades se miran: la imagen real no se forma aquí entre las dos lentes, como en el caso anterior, sino delante del sistema. Los dos vidrios actúan entonces como uno solo para dar una imagen virtual y amplificada de la imagen real. Además la primera lente corrige las aberraciones.

Interpongamos ahora la lente *n*. Los rayos rojos son aproximados al eje OO', por esta lente y van á formar su foco en *r* y *r'*, en los ejes secundarios CR y CR'; análogamente los rayos violados forman los suyos en *v* y *v'*, más cerca de la lente. Concíbese que combinando convenientemente las curvaturas de las lentes *n* y O, así como su distancia, se pueda llegar á poner los focos *v* y *r* en línea recta con el centro óptico del ocular O. Los demás haces coloreados forman evidentemente sus focos en la línea *vr* : luego, cuando se miran á través del ocular los siete haces, como se ven todos bajo el mismo ángulo, hay recomposición de la luz por efecto de la superposición de las impresiones en la retina y la irisación desaparece.

437. **Campo. — Diafragma. — Punto ocular.** — Llámase *campo* al espacio angular en que se encuentran comprendidos todos los puntos visibles á través del ocular, en una posición dada del instrumento de óptica. El campo está *limitado por una superficie cónica que tiene como vértice el centro óptico del objetivo, y por base la*

Fig. 445.

abertura de un diafragma pq, situado delante del ocular en el plano de la imagen suministrada por el objetivo (fig. 445). La segunda hoja de este cono va á cortar el objeto en *ab*, y limita su parte visible : dícese que la porción *ab* está en el *campo* del instrumento.

Cuando un objeto sale de los límites del campo, sólo una parte de él es visible. Pero si se interpone un vidrio convergente tal como la lente *n*, rayos como B*ei*, que eran interceptados por el diafragma, se acercan al eje yendo á caer sobre el ocular, y el punto B, que no era visible, pasa á serlo. Vese pues que el vidrio *n* (*vidrio de campo*) aumenta el campo ; pero al reducir la imagen *a' b'* *disminuye el aumento.*

El *diafragma pq* está formado por un disco delgado de latón ennegrecido, taladrado por una abertura central. Tiene por objeto no dejar pasar más que los rayos que llegan al ocular con escasa oblicuidad, reduciendo de este modo la aberración de esfericidad.

Punto ocular. — Hay un punto donde los rayos van á reunirse al salir del ocular; llámasele *punto ocular*. Éste es *respecto del último vidrio del ocular*, el foco conjugado del centro óptico del objetivo (considerado como punto luminoso). Y, en efecto, de este último punto es de donde salen los ejes secundarios de todos los haces luminosos que inciden sobre el ocular. Así pues, donde todos esos ejes van á converger es en la imagen de este punto, y allí se debe colocar la vista para abarcar todo el campo. Si estuviera más cerca ó más lejos, sólo recibiría una parte de los rayos emergentes.

Ojete. — Para fijar la posición del ojo, se coloca delante del ocular un *ojete* negro *rs*, taladrado por una abertura central, de modo que la vista, al encontrarse delante de ella, se halle justamente en el punto ocular.

INSTRUMENTOS DE ÓPTICA ASTRONÓMICOS.

438. **Anteojos ó Refractores. — Telescopios ó Reflectores.** — Los instrumentos de óptica usados en los trabajos y mediciones astronómicas se dividen en dos clases :

1°. Los *anteojos* ó *refractores* en que la imagen se obtiene por la refracción de la luz á través de una lente llamada *objetivo;*

2°. Los *telescopios* ó *reflectores*, en que la imagen se obtiene por la reflexión de la luz en un espejo esférico ó parabólico.

Tanto en el foco del refractor como en el del reflector se coloca ordinariamente un marco metálico, provisto de hilos delgados, fijos ó móviles, por medio de los cuales se efectúan las mediciones : ese es el *micrómetro* (fig. 446).

Fig. 446.

En los observatorios se usan dos tipos principales de instrumentos astronómicos :

1°. Los *instrumentos meridianos*, que sirven para las observaciones de gran precisión: éstos son móviles únicamente en torno de un eje horizontal, perpendicular al meridiano; por consiguiente en su movimiento describen el meridiano;

2°. Los *instrumentos ecuatoriales*, que sirven para los trabajos de investigación, así como para las medidas diferenciales, pues están dispuestos de manera que con ellos se puede mirar cualquier punto del cielo. Los *telescopios* pertenecen á esta clase, pues en general se les coloca *ecuatorialmente*[1].

439. **Refractor** ó **Anteojo** llamado **astronómico.** — 1°. *Marcha de*

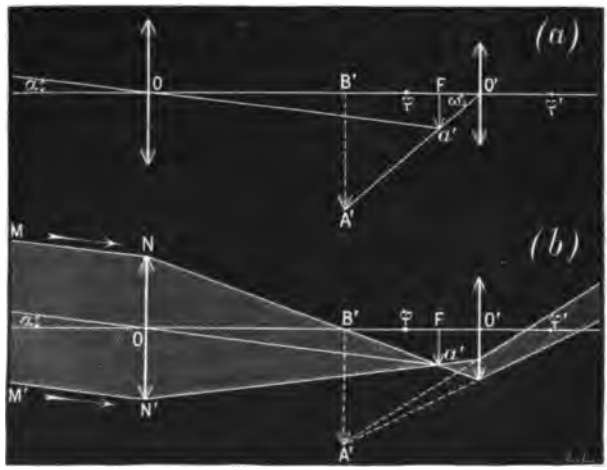


Fig. 447.

los rayos. — El objetivo O (fig. 447, *a*) da una imagen *a'* F del astro que se observa[2], real é invertida, la cual, por causa de la gran dis-

1. Los párrafos relativos á los instrumentos astronómicos han sido redactados con la colaboración de M. G. Périgaud, astrónomo del Observatorio de París.

2. En esta construcción no se representan más que los ejes secundarios extremos del objeto que se observa ; pues en realidad este objeto esta siempre muy lejos del objetivo. La misma observación se aplicará en lo que sigue á todos los instrumentos astronómicos.

tancia del objeto, se forma en el foco principal F del objetivo. Esta imagen es la que se mira con un ocular compuesto, que sirve de lente. Suponiéndolo reducido al vidrio O', se obtiene por la construcción conocida una imagen virtual A'B' de la imagen real *a'* F.

En la fig. 447, *b* se ve la marcha á través del anteojo de una porción del haz luminoso que llega del astro. Las líneas llenas representan los rayos reales, y las de puntos sus prolongaciones geométricas.

2°. *Aumento.* — Se llama aumento á *la relación del diámetro aparente de la imagen, vista en el anteojo, con el diámetro aparente del objeto á simple vista.*

Sea *a*O*b* (fig. 448) el diámetro aparente del objeto, A'B' la imagen real y A"B" la imagen virtual. Tiénese, por definición,

$$G = \frac{A''O_1B''}{aOb}.$$

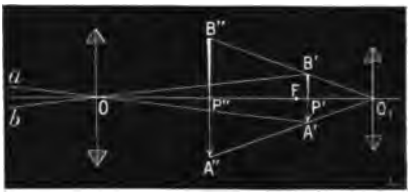


Fig. 448.

Para calcular este cociente, se pueden reemplazar los arcos por sus tangentes trigonométricas.

Tiénese primeramente $A''O_1B'' = 2A'O_1P'$ y $aOb = 2A'OP'$,

y por consiguiente, $$G = \frac{A'O_1P'}{A'OP'}.$$

Por otra parte, tang $A'O_1P' = \frac{A'P'}{P'O_1}$ y tangente $A'OP' = \frac{A'P'}{P'O}$.

Sustituyendo resulta $G = \frac{P'O}{P'O_1}$.

P'O se diferencia poco de F, distancia focal principal del objetivo O,
P'O_1 — de *f*, — — del ocular O_1.

Sustituyendo estas distancias, tenemos $G = \frac{F}{f}$.

Este es un *límite inferior* del aumento. En efecto,

por una parte se tiene. . . . P'O siempre $> F$,
y por otra . . . . . P'O_1 — $< f$.

3°. *Anteojo explorador.* — Los anteojos de mucho aumento tienen muy poco campo (437) y son incómodos para buscar un astro : por esto se coloca sobre el tubo principal del anteojo otro pequeño llamado *explorador*, cuyo eje óptico está dispuesto paralelamente al del grande (fig. 449 y 450). Se explora el cielo con ese auxiliar, que aumenta menos, pero que tiene mayor campo ; después se observa con el anteojo, cuyo eje se encuentra colocado necesariamente en la dirección del objeto.

4°. *Eje óptico y línea de mira.* — La recta que une el *centro óptico* del objetivo con *un punto designado del retículo del micrómetro* es el *eje óptico* del anteojo. Por

consiguiente, se pueden obtener tantos ejes ópticos como puntos se pueden elegir en el micrómetro. Moviendo el punto de cruce, varía la posición del eje

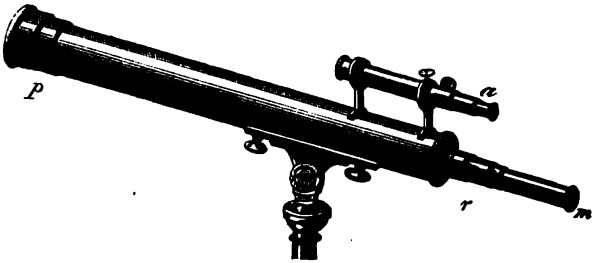


Fig. 449.

óptico ; pero en general se hace que éste coincida con el eje geométrico, es decir

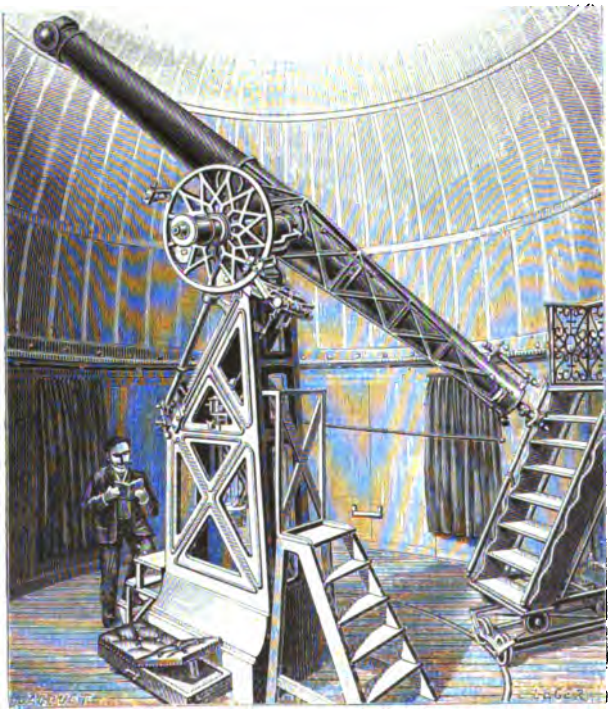


Fig. 450. — Ecuatorial de grandes dimensiones (Torre del Oeste. Observatorio de París).
Diámetro del objetivo : 0,31 m. — Distancia focal : 5,25 m.

con el del tubo del anteojo. El eje óptico determinado de este modo se convierte en la *línea de mira*. Para determinar un punto, se dirige el anteojo de manera

que la imagen se forme exactamente en el cruce de los hilos. *De día*, los hilos del retículo se destacan claramente en el campo del anteojo; *en la oscuridad* hay que alumbrarlos por medio de un mechero de gas dispuesto lateralmente y cuyos rayos son dirigidos primero por una lente al tope *hueco* que sirve de eje de rotación, y luego sobre el micrómetro gracias á un pequeño prisma de reflexión total.

Longitud del anteojo. — Es igual á OF + O'F, quiere decir á la suma de las distancias focales próximamente; crece con el aumento. En un buen anteojo el aumento no pasa de 1000, y entonces el tamaño llega á 8 metros.

440. **Medida experimental del aumento. — Método de Ramsden.** — 1°. *Principio: Punto ocular y círculo ocular de Ramsden.* — El *objetivo* O que está expuesto á la luz directa del astro, desempeña respecto del *ocular* O_1 el papel de un objeto luminoso, y el *ocular* O_1 hace veces de objetivo respecto de ese objeto luminoso (fig. 451).

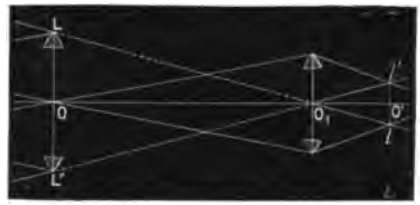


Fig. 451.

Por consiguiente, se tendrá más allá del ocular una imagen *ll'* real y reducida, del objetivo LL'; ésta se formará á una distancia O_1O' tal que se tenga

$$\frac{1}{O_1O'} + \frac{1}{O_1O} = \frac{1}{f}$$

y la magnitud de la imagen *ll'* estará dada por la ecuación $\frac{ll'}{LL'} = \frac{O_1O'}{O_1O}$

El punto O' conjugado del punto O_1 se llama *punto ocular de Ramsden:* la imagen *ll'* se denomina *círculo ocular de Ramsden.*

Observando que O_1O es sensiblemente igual á F + *f*, se ve sin dificultad que

$$\frac{O_1O}{O_1O'} = \frac{F}{f}, \quad \text{de donde} \quad \frac{LL'}{ll'} = \frac{F}{f} = G.$$

Luego el cociente $\frac{LL'}{ll'}$ es igual al aumento realmente lineal. Basta, pues, con medir LL' y *ll'*.

2°. *Operación: Dinámetro de Ramsden.* — La medida de *ll'* se efectúa con precisión por medio del *dinámetro* de Ramsden.

Consiste éste en una pequeña lente colocada en un sistema de tres tubos con dos alargaderas (fig. 452). 1 es el tubo que sostiene la lente; 2 es un tubo donde se halla un micrómetro M de cuerno translúcido, dividido en centésimos de milímetro; 3 es un tercer tubo, ó mejor dicho, un anillo donde penetra el sistema de 1 y 2 y que se puede adaptar al ocular del anteojo.

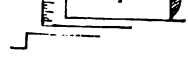


Fig. 452.

La armadura 3 se atornilla en el ocular del anteojo.

Se introduce 1 en 2 hasta que se vea claramente la imagen del micrómetro, y luego todo en 3 hasta que la imagen del círculo ocular vaya á pintarse sobre la del micrómetro. Entonces se puede calcular la magnitud *ll'* con toda la precisión de una medida efectuada por medio de la lente.

Para medir LL' es decir, el diámetro de la porción eficaz del objetivo, se usa un compás cuyas puntas, colocadas sobre éste, van á formar su imagen sobre la circunferencia del *círculo ocular.*

441. **Claridad en los anteojos.** — Se llama *claridad* á la relación que existe entre las cantidades de luz que recibe la retina cuando se mira un objeto con el anteojo y á *simple vista.* Hay que considerar dos casos perfectamente distintos: 1°. El de que el anteojo *tenga un aumento*; 2°. el de que el anteojo *no tenga aumento.* El primero es el de los objetos luminosos de diámetro aparente sensible como los planetas á los objetos terrestres, y el segundo el de aquellos que care-

cen de diámetro aparente sensible, como las estrellas de todas magnitudes.

1°. *Caso de los planetas.* — La cantidad de luz enviada por la unidad de superficie del planeta al anteojo que lo mira, es evidentemente proporcional á la *abertura* del anteojo, quiere decir, á la sección del objetivo. Designando por 1 la intensidad del haz enviado por la unidad de superficie del objeto, podremos representar por $\frac{y^2}{1}$ ó y^2 la intensidad del haz que penetra en el anteojo (y es el diámetro del objetivo). Si el anteojo no tuviera aumento, este mismo coeficiente

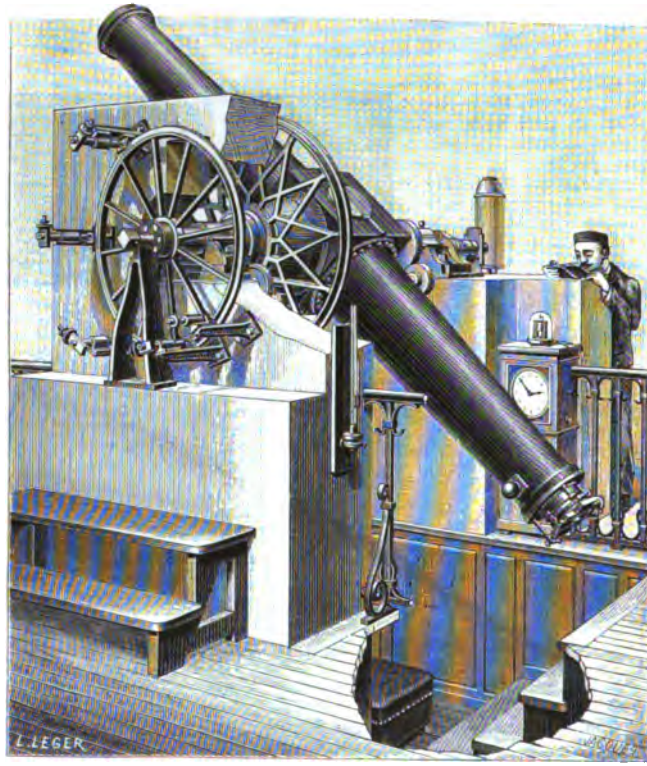


Fig. 453. — Círculo meridiano de grandes dimensiones (Observatorio de París).

y^2 representaría la intensidad (por unidad de superficie) del haz que penetra en la vista. Pero el anteojo tiene generalmente un aumento lineal G : luego la cantidad de luz y^2 se desparrama, no ya sobre una superficie 1, sino sobre otra igual á G^2; por consiguiente $\frac{y^2}{G^2}$ es la intensidad del haz transmitido por el anteojo.

Por otra parte, la intensidad del haz enviado directamente á simple vista por la unidad de superficie del astro es *proporcional* á la abertura de la niña ó pupila : en consecuencia se la puede representar por ω^2 (llamando ω al diámetro de la pupila). Luego, se obtendrá la claridad C haciendo la división de estas dos intensidades :

$$[1] \qquad C = \frac{\frac{y^2}{G^2}}{\omega^2} = \frac{y^2}{\omega^2} \cdot \frac{1}{G^2}.$$

Es fácil interpretar esta fórmula observando que el valor de G es igual á $\frac{y^2}{y'^2}$ (método del dinamómetro de Ramsden, siendo y' el diámetro del círculo ocular de Ramsden). Sustituyendo este valor, resulta

$$[1\ bis] \qquad C = \frac{y'^2}{\omega^2} = \left(\frac{y'}{\omega}\right)^2.$$

Ahora bien, en los anteojos bien construídos, el diámetro del círculo ocular es generalmente *inferior* al de la niña del ojo. Luego el cociente $\frac{y'}{\omega}$ es más pequeño que 1 : luego, en general, tratándose de objetos que tienen diámetro aparente sensible, el brillo de las imágenes que dan los anteojos es inferior al brillo de los objetos mirados á simple vista; y el máximum de claridad que se puede obtener en estos aparatos es el de la *visión directa*.

2°. *Caso de las estrellas.* — La imagen de una estrella no tiene mayor diámetro sensible que la estrella misma, mirada á simple vista. De consiguiente, para comparar los brillos ó claridades de la imagen y de su objeto, basta comparar las intensidades de los dos haces incidentes (en el anteojo y en la vista). Pero el primero tiene una intensidad que puede representarse por y^2 (siendo y el diámetro del objetivo). Esta intensidad se conserva en el haz emergente del anteojo que penetre en el ojo, puesto que hallándose concentrado este haz en el diámetro del círculo ocular y', se introduce todo entero por la niña del ojo, cuyo diámetro ω es $> y'$. Por otra parte el haz que incidiera directamente sobre la vista sin aparato tendría como intensidad ω^2 (siendo ω el diámetro de la niña del ojo). Luego se tiene $C = \frac{y^2}{\omega^2}$.

C es mucho mayor que 1 ; por consiguiente, la *claridad* en este caso aumenta de manera considerable por la visión á través del anteojo. Tal es la razón de que con los instrumentos astronómicos se distingan estrellas completamente invisibles á simple vista.

442. **Instrumentos meridianos y ecuatoriales.** — El anteojo astronómico es el órgano esencial de los *Instrumentos meridianos*, así como de los *Ecuatoriales*.

Un *Círculo meridiano* está constituído por un anteojo y por un *círculo* perpendicular al eje, que le sirve de centro (fig. 453). Con este instrumento se calculan sucesivamente en el momento de pasar un astro :

1°. La hora del paso por el meridiano, anotando los instantes de los pasos sucesivos en los diferentes hilos verticales del micrómetro;

2°. La altura del astro sobre el horizonte, por medio del círculo y de microscopios instalados de manera fija frente á su plano.

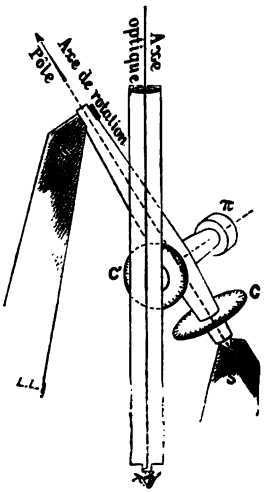


Fig. 454.

En un *Ecuatorial* (fig. 450) el anteojo tiene dos movimientos : uno, en un plano paralelo al eje del mundo, de tal manera que el eje óptico del anteojo pueda formar con el eje del mundo un ángulo cualquiera, medido en el círculo C' (fig. 454) ; el otro es un movimiento cónico alrededor del eje del mundo. Este último se mide en un círculo C perpendicular al eje y cuyas divisiones pasan delante de un índice fijo. De manera que este círculo es paralelo al ecuador : por esto se llama *ecuatorial* el instrumento. El movimiento cónico se obtiene con ayuda de un *regulador Foucault*, que le da duración igual á la del movimiento diurno. Esto permite al observador seguir continuamente un astro, una vez que éste ha entrado en el campo.

Cada ecuatorial está resguardado por una *cúpula* que rueda sobre garruchas en torno de un eje vertical que pasa por el eje del instrumento. La cúpula presenta una abertura en forma de husillo (fig. 450), que se puede abrir por medio

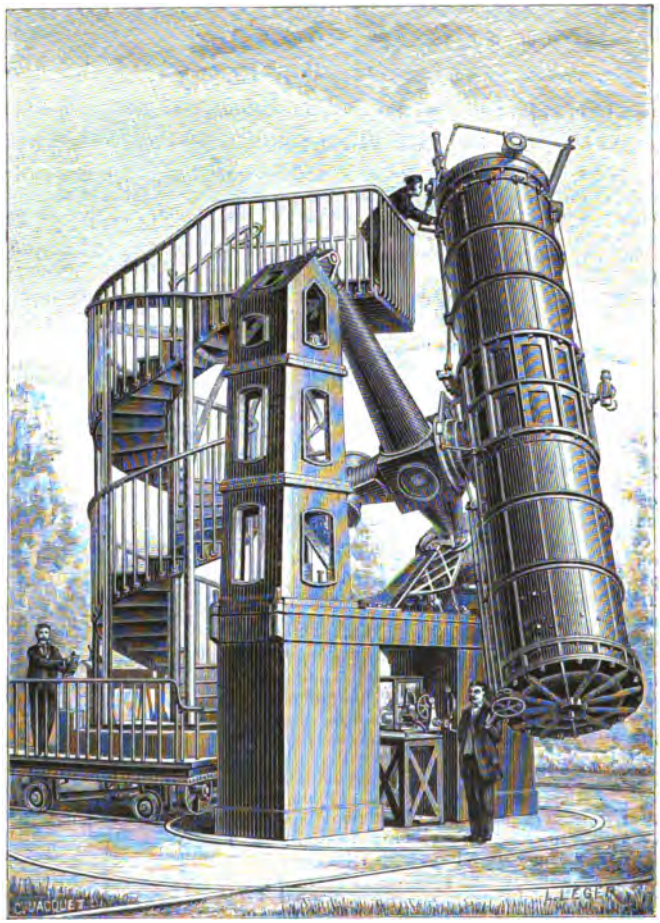


Fig. 455. — Telescopio de grandes dimensiones (Observatorio de Paris).
Espejo de vidrio plateado de 1,20 m. — Distancia focal : 7,20 m.

de trampas-ventanas, llevándola, gracias á la rotación del conjunto, frente á la región del cielo que se desea observar.

443. **Ecuatorial acodillado.** — Recientemente se ha imaginado é instalado en el Observatorio de Paris por su director M. Lœwy un instrumento de esta clase. Es el *ecuatorial acodillado*, que permite al observador ver un punto cualquiera del cielo sin mudar de sitio, permaneciendo tranquilo en un gabinete, al abrigo de las intemperies del aire. Á estas ventajas, tan preciosas para el observador, se agrega el de hacer inútiles las inmensas cúpulas tan caras : permitiendo reem-

plazarlas en caso necesario por un simple tinglado de madera, movible á lo largo de rieles en el momento de la observación : de tal manera que mientras el astrónomo está á cubierto, la parte óptica del instrumento (objetivo y espejo) se hallan al aire libre.

M. Læwy ha obtenido este resultado gracias á una ingeniosa combinación de superficies ópticas.

El tubo que sostiene el objetivo se encuentra fijo perpendicularmente al eje del mundo y puede girar en torno suyo. Este tubo lleva una abrazadera que

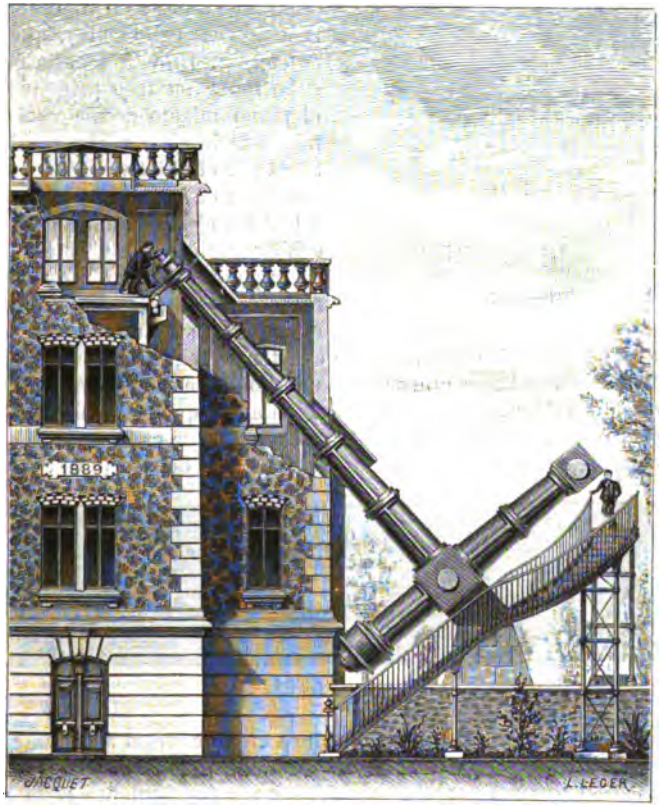


Fig. 456. — Gran ecuatorial acodillado. (Observatorio de París).

sostiene el espejo M (fig. 457), con inclinación de 45° y móvil en torno del eje del tubo. Si este espejo se encuentra frente á una estrella cuya dirección sea perpendicular al eje del tubo, los rayos de la misma serán dirigidos en el anteojo paralelamente á dicho eje ; pero cuando llegan al centro del instrumento, tropiezan con otro espejo M', que tiene 45° de inclinación, y que los refleja en la dirección del eje del mundo sobre el micrómetro colocado delante de la vista del observador. Gracias á este doble movimiento del tubo objetivo alrededor del eje del mundo y del espejo en torno del eje del tubo, se puede enviar sobre el micrómetro el astro que se quiera.

444. Anteojo terrestre. — El *anteojo terrestre* ó *de larga vista* se distingue del astronómico en que produce imágenes rectas. Obtiénese su enderezamiento por medio de un sistema de dos vidrios convergentes O_1 y O_2 (fig. 458), que se llama el *vehículo*. Están colocados en el mismo tubo que el ocular y separados uno de otro por su distancia focal principal φ, que les es común. El vidrio anterior O_1 debe tener su foco principal en el plano mismo donde va á formarse la imagen aérea suministrada por el objetivo O.

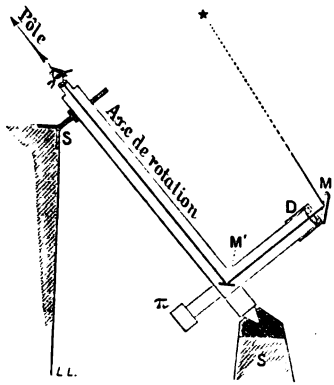


Fig. 457.

Marcha de los rayos. — Sean OA' y OB' los ejes secundarios de las dos extremidades del objeto (que se supone colocado muy lejos, fuera de los límites de la figura): el objetivo suministra una imagen real é invertida A'B', que se construye según las reglas ordinarias. Los dos haces que divergen de las extremidades A' y B' (así como de los demás puntos de la imagen aérea que están situados en el plano focal de O_1), se refractan de modo que cada uno de ellos sale paralelamente á su eje secundario respecto del vidrio O_1 : y cada

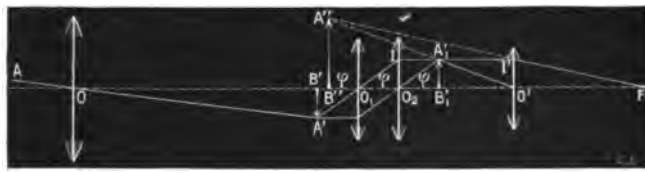


Fig. 458.

uno de estos haces paralelos encuentra en su camino á la lente O_2, que lo hace converger á su plano focal. De modo que se forma en $A_1'B_1'$ una imagen invertida de A'B' y por consiguiente *recta* respecto del objeto. Y si se mira la imagen $A'_1B'_1$ con una lente O', se ve una imagen A"B" virtual y amplificada de AB.

La figura indica la marcha completa del haz que emana de la extremidad A' de la imagen real; la construcción demuestra que $A'_1B'_1$ es igual á A'B'.

Aumento. — Se le define de la misma manera que en el anteojo astronómico y se llega á obtener la misma fórmula.

Ocular cuádruple ú *Ocular terrestre.* — En la figura 458 se ha supuesto simple el ocular O'; pero en realidad es un negativo de dos

vidrios, montados en el mismo tubo y á distancias constantes, con las lentes O_1 y O_2; de manera que el conjunto forme un *ocular de cuatro vidrios*, especial para el anteojo terrestre y llamado algunas

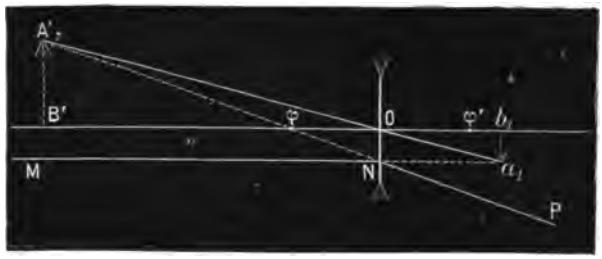


Fig. 459.

veces *ocular terrestre*. Este ocular es de alargadera doble como el del anteojo astronómico : se efectúa el afocamiento moviéndolo lentamente.

445. Anteojo de Galileo. — El *anteojo de Galileo* ó *de teatro* es el más sencillo de estos aparatos, pues sólo se compone de dos sistemas de vidrios (fig. 460). El primero es un sistema convergente O_1, constituído por una lente bicóncava de *flint-glass*, contenido entre dos lentes convexas de vidrio ordinario ó de *crown-glass*. El ocular es una lente convexa de *flint*, O, abarcada por dos lentes cóncavas de *crown*. El cuerpo del anteojo se compone de un tubo grueso y corto, T_1, donde está el objetivo, en el cual puede deslizarse una alargadera T, que contiene el ocular.

Fig. 460.

Marcha de los rayos. — Sea $a_1\,b_1$ la imagen invertida, real y más pequeña que el objeto, suministrada por el objetivo (fig. 459). El ocular O está interpuesto en el trayecto de los rayos convergentes, de modo que su foco φ' se encuentre *más acá de la imagen* : ésta se convierte de cierta manera en *virtual*, y los rayos que irían á formarla *realmente* de no estar interceptados, se refractan atravesando el ocular de modo que divergen. Consideremos en este haz divergente el rayo que pasa por el centro óptico del ocular : ese pasa sin desviación, es un eje secundario. Consideremos además el rayo MN, paralelo al eje, que *iría á contribuir* á la formación de la imagen a_1, si no encontrara la lente : éste se refracta en NP, de modo que su prolongación geométrica pasa por el foco φ de la lente. El punto de encuentro A' de estos dos rayos es el vértice

de la imagen virtual suministrada por el ocular. Trazando A'B', perpendicular al eje principal, se tiene la imagen.

Aumento. Éste tiene por valor-límite el cociente $\frac{F}{f}$ (siendo F, f las distancias focales del objetivo y del ocular) como en todos los instrumentos astronómicos, refractores ó reflectores.

Ventajas é inconvenientes. — De ahí resulta que la separación de los dos vidrios es casi igual á la diferencia de sus distancias focales y, en consecuencia, que el anteojo de Galileo es muy pequeño y fácil de transportar. Permite ver los objetos en su verdadera posición y como por otra parte sólo tiene dos vidrios, absorbe poca luz; así es que hoy se le usa en las lecturas de precisión como *revisor*, en vez del anteojo ordinario.

Gemelos ó anteojo binocular. — También se usa este anteojo para el teatro, ya sencillo, ya doble. En este último caso tenemos los *gemelos* y la visión es *binocular*, quiere decir que se forma una imagen en cada ojo.

Un sistema de botón y barra dentada permite mover simultáneamente las alargaderas de los dos anteojos.

446. **Aplicaciones científicas de los anteojos terrestres. — Arreglo del catetómetro.** — Los anteojos terrestres (ó simplemente *anteojos*) entran como órgano esencial en gran número de aparatos ó instrumentos de física. Vamos á explicar su uso describiendo la operación del arreglo del catetómetro.

Arreglo del catetómetro. — Este arreglo comprende dos clases de operaciones sucesivas :

1°. La *comprobación del anteojo y de su nivel;* 2°. *el arreglo del sostén del anteojo* y el del *eje de rotación.*

I. *Comprobación del anteojo y de su nivel.* — Esta operación preliminar se efectúa de una vez para siempre. Lo que define la dirección según la cual se mira por medio de un anteojo, es el eje óptico (439, 4°). Cuanto al eje *geométrico* del anteojo, está definido por los dos centros de los dos collares iguales en que descansa el instrumento (fig. 72).

1°. *Comprobación del anteojo.* — Consiste en examinar si el *eje óptico* coincide con el *geométrico* del anteojo. — Mírase un punto exterior M, cuya imagen M' se lleva al punto de cruce de los hilos (fig. 461). Supongamos que este punto I no se encuentre en el eje geométrico. En éste caso, haciendo girar al instrumento sobre sí mismo, el eje óptico OI se moverá trazando una superficie cónica. Cuanto á la

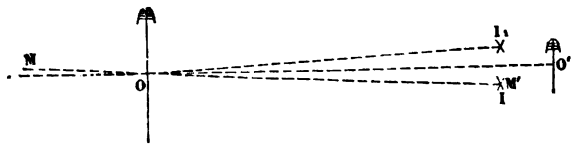


Fig. 461.

imagen M', permanecerá en su sitio sobre la prolongación de la línea OM, que es su eje secundario, pero ya no coincidirá con el cruce de los hilos, que ha sido llevado á I_1. Se ve que el movimiento angular IOI_1, es la mitad del ángulo que forma actualmente el eje de la figura del anteojo con su eje óptico. Moviendo el retículo I (por medio de un tornillo dispuesto al efecto) una distancia igual á la

mitad de II_1, se obtendrá la coincidencia buscada. Nótase que se ha logrado así cuando, al hacer girar el anteojo sobre su eje, la imagen M' no se aparta ya del punto I.

Observación. — No es indispensable que la burbuja esté al principio entre los puntos de referencia; puede ocupar una posición cualquiera en el nivel con tal de que vuelva á la misma posición en el espacio respecto del observador, después de vuelto el anteojo; pero es preferible operar según se ha dicho.

2°. *Comprobación del nivel.* — Consiste en comprobar si la *línea de los puntos de mira del nivel mn* (fig. 70) *es paralela al eje geométrico* del anteojo.

Se empieza por actuar sobre el tornillo *p*, que hace mover la horquilla *i* alrededor del eje *c*, hasta que la burbuja del nivel vaya á colocarse entre sus puntos de mira. En este momento la línea de esos puntos es horizontal. De manera que si el eje geométrico del anteojo fuese paralelo á la línea de los puntos de mira, actualmente sería *horizontal*. Fácil es verlo *volviendo* el anteojo *de punta á punta* en sus abrazaderas.

En efecto, el sistema entero gira alrededor de un eje *zz* perpendicular al eje geométrico OO' (fig. 462) y, por consiguiente, la extremidad O va á O' y *viceversa*. Pero si OO' fuera horizontal, el eje de rotación *zz* sería una línea vertical, igual-

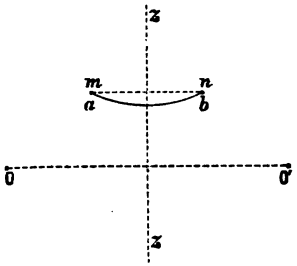


Fig. 462.

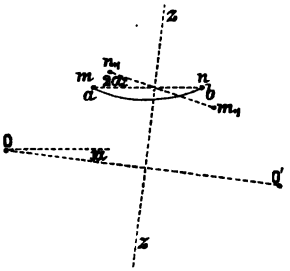


Fig. 463.

mente perpendicular á la de los puntos de referencia *mn*, así como á la línea de los extremos de la burbuja *ab*; entonces *n* pasa á *m* y *viceversa*, y parece coincidir siempre con *ab*, que permanece en el mismo sitio.

Pero supongamos que la condición de paralelismo, entre OO' y *mn* no se halle satisfecha (fig. 463). Si se vuelve el sistema punta á punta, las extremidades *a* y *b* de la burbuja, que permanece horizontal, no quedan en las de la línea de los puntos de mira, que pasa á m_1n_1. La nueva posición de ésta, que es simétrica de *mn* respecto del eje *zz*, forma con la antigua un ángulo 2 α, precisamente indicado por el movimiento aparente de la burbuja.

Entonces se actúa sobre la línea de los puntos de referencia, de modo que su inclinación varíe α, operación que se efectúa por medio de un tornillo de que está provisto el nivel. Después se empieza otra vez el ensayo anterior, volviendo punta á punta, hasta reducir á cero el cambio de posición de la burbuja respecto de *mn*. En este momento se podrá considerar la línea de los puntos de referencia del nivel como exactamente paralela al eje geométrico (y por consiguiente al eje óptico) del anteojo.

II. *Arreglo del soporte ó montante y del eje de rotación.* — Falta por arreglar el catetómetro, de modo que el eje óptico del anteojo se mueva siempre en un plano horizontal, sea cual fuere su posición en el eje del instrumento. Esta operación se compone de dos partes.

1°. *Hacer el eje óptico del anteojo perpendicular al de rotación del soporte ó montante.*

Supongamos satisfecha esta condición: se comprobará que así es de la manera siguiente: sea cual fuere la orientación *zz* del eje de rotación del instrumento (fig. 464), el eje óptico del anteojo tiene una dirección tal como OO', perpendicular á *zz*. Así pues, si se hace dar vueltas al sistema 180° alrededor de *zz*, la burbuja del nivel conservará en el espacio la misma posición respecto del

observador, y si se vuelve el anteojo punta á punta, la burbuja quedará debajo de la misma marca que primitivamente.

Supongamos, por el contrario, que el eje óptico del anteojo sea $O_1O'_1$, y que forme un ángulo α con la orientación normal OO'. Si se efectúa la doble operación precedente, el eje óptico del anteojo irá á colocarse en $O_2O'_2$, simétricamente con OO'_1, respecto de zz_1 (O_1 á O_2 y O'_1 á O'_2) y el ángulo $O_1CO'_2$ será precisamente igual á 2α. Y si se vuelve el anteojo punta á punta, no se hará más que volver á colocar la línea de los puntos de referencia hacia el mismo lado respecto del eje, de modo que el movimiento de la burbuja respecto de la línea de los puntos de referencia dará directamente la medida del ángulo 2α.

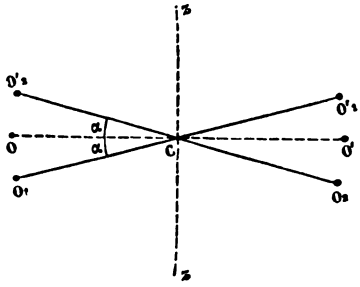


Fig. 464.

La falta de paralelismo se remediará actuando sobre el tornillo *p* (fig. 72) de modo que el movimiento de la burbuja disminuya próximamente α. Después se examinará si esta corrección es suficiente, viendo si se realiza la perpendicularidad. En el caso contrario se repetirá la misma operación, y así sucesivamente.

Observación. — Es útil colocar la burbuja entre sus puntos de referencia, lo mismo que en la operación I ; entonces debe permanecer allí, cuando se hace girar 180°.

2°. *Hacer vertical el eje del soporte ó montante.* — Sólo falta poner vertical el eje del instrumento. Esta operación es casi idéntica á la que consiste en hacer horizontal un plano por medio del nivel de burbuja de aire (138). En efecto, basta mover los tornillos de la peana del aparato hasta que la burbuja del nivel vaya á colocarse entre sus puntos de mira para dos posiciones casi rectangulares del anteojo. Pues entonces el eje del catetómetro, que es perpendicular á dos horizontales, es una *línea vertical.*

447. Telescopio de Newton. — Hemos visto que los *telescopios* ó *reflectores* tienen por objetivo un espejo cóncavo. El del telescopio de Newton era un espejo esférico metálico.

En M se encuentra el objetivo que recibe los rayos del astro (fig. 465) y en *m* un pequeño prisma rectangular de vidrio de reflexión

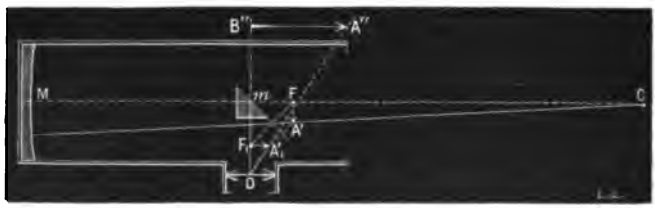


Fig. 465.

total. Sin la interposición de este prisma, produciríase en A'F, en el foco principal del espejo, una imagen real, invertida y muy pequeña del astro. Pero los rayos, reflejados por primera vez en M, son interceptados por el prisma y reflejados totalmente en la hipotenusa,

de modo que la imagen es enviada á $A'F_1$, quedando en posición simétrica de A'F respecto del plano *m* prolongado. Se la mira con un ocular de mucho aumento O, que da por fin la imagen A"B", virtual y muy agrandada.

Aumento. — El aumento lineal se define, en los telescopios lo mismo que en los anteojos, diciendo que es la relación de los diámetros aparentes de la imagen y del objeto. Tiénese, pues

$$G = \frac{\text{ángulo } A''OB''}{\text{ángulo } A'CF}.$$

Sustituyendo estos ángulos por sus tangentes trigonométricas y efectuando las reducciones ordinarias, se encuentra la fórmula general $G = \frac{F}{f}$, siendo *F* la distancia focal principal del espejo objetivo y *f* la de la lente-ocular.

448. **Telescopio de Foucault.**— Habiendo logrado Foucault platear los espejos de

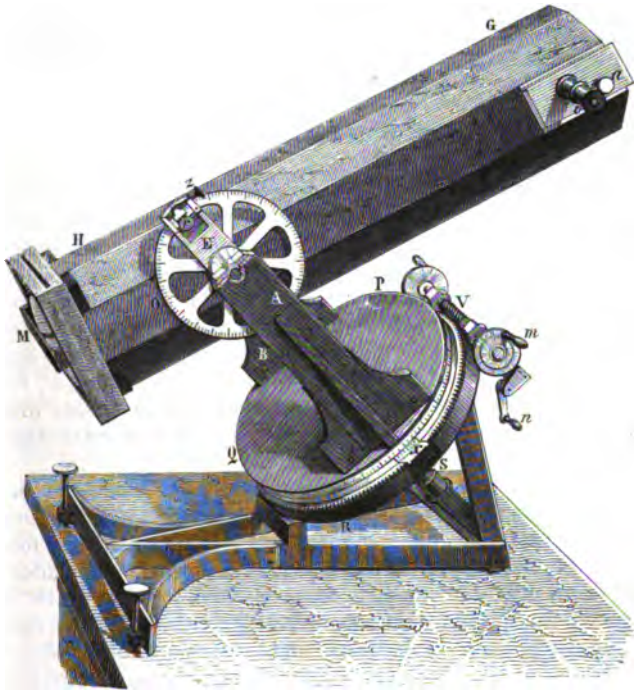


Fig. 466.

vidrio y darles pulimento bastante perfecto para que pudieran reflejar 75 por 100 de la luz incidente, pensó en aplicar su método al telescopio de Newton. Su

primer espejo no tenía más que 10 centímetros de diámetro; pero sucesivamente construyó otros de 22, de 33, de 42 y de 80 centímetros.

Es evidente que estos objetivos no tienen ninguna aberración de refrangibilidad. Cuanto á las de esfericidad, Foucault logró hacerlas desaparecer por medio del método de los *retoques locales*.

Los nuevos telescopios de espejo parabólico de vidrio plateado tienen sobre los antiguos de espejo metálico esférico la triple ventaja de dar imágenes más claras y de ser menos pesados y menos largos: su distancia focal no es sino de seis veces el diámetro del espejo (fig. 455 y 466).

Ocular. Para simplificar la construcción (fig. 465) hemos supuesto que el ocular es de un solo vidrio; pero el de Foucault tiene *cuatro* O y está dispuesto en un lado del telescopio (fig. 466); según su poder y el tamaño del espejo plateado puede dar un aumento de 50 á 800.

Descripción completa. — El cuerpo es de madera y tiene la forma de un grueso tubo octogonal (fig. 466). La extremidad G está abierta; en la otra se encuentra el espejo. Este telescopio es un instrumento móvil, que se puede mover según se quiera en un terrado, para observar un cuerpo celeste cualquiera; no podría servir para medidas de precisión. Los que se destinan á este último fin son *fijos* y están instalados *ecuatorialmente*.

Manipulación y afocamiento. — Para fijar el telescopio en declinación, hay una pieza de cobre E, unida al montante A y que sostiene una horquilla donde se desliza el limbo O, y que se aprieta con un botón de tornillo *r*. Finalmente, en un lado del aparato está el ocular *o*, montado en una placa de cobre de corredera, la cual sostiene también el pequeño prisma *m*, representado en la figura esquemática (fig. 465). Para afocar basta con hacer adelantar ó retroceder esta placa mediante una cremallera y un botón *a*. El manubrio *n* sirve para hacer entrar en movimiento el tornillo V ó para soltarlo.

INSTRUMENTOS Ó APARATOS DE PROYECCIÓN.

449. **Definiciones.** — Se llama *aparatos de proyección* á unos instrumentos de óptica reducidos á un *sistema objetivo* y destinados á proyectar sobre una pantalla blanca en la cámara oscura, imágenes reales y aumentadas de los objetos pequeños. Éstos consisten de ordinario en cuadros transparentes, pintados ó fotografiados en vidrio, y muy bien iluminados (linterna mágica, microscopio solar, linternas de proyección). También es posible proyectar objetos opacos, una de cuyas caras es iluminada por reflexión (megascopio). El uso de estos instrumentos se ha generalizado mucho en los últimos años, con gran provecho para la vulgarización y la enseñanza en todos los grados y en todas sus formas.

450. **Linterna mágica.** — La *linterna mágica*, inventada por el P. Kircher, es el más antiguo de los aparatos de proyección. Consiste en una caja de latón donde se puede colocar una luz en el foco de un reflector cóncavo A (fig. 467 y 468). Los rayos reflejados son recibidos en una lente convergente B, que los concentra sobre diversas figuras pintadas en una lámina de vidrio V. Estas figuras, iluminadas muy bien según queda dicho, se colocan delante de otra lente convergente C, á distancia algo mayor que su distancia focal principal. Esta segunda lente da una imagen real, invertida y muy aumentada de aquellas, imagen que va á proyectarse en una pantalla convenientemente alejada (fig. 467). Para obtener imágenes

rectas, se coloca en la linterna la placa de vidrio pintado de manera que los dibujos hechos en ella estén invertidos.

Aumento. — El aumento suministrado por la linterna mágica está

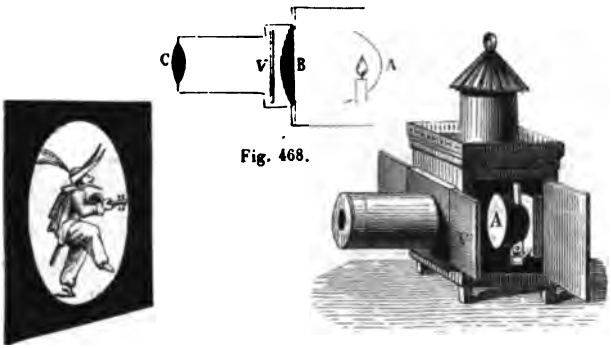


Fig. 468.

Fig. 467.

determinado por la fórmula de las lentes. Llamando p' y p á las distancias de la lente C á la pantalla y al objeto, se tiene

$$\frac{I}{O} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p-f}.$$

Por consiguiente, si la imagen está diez veces más lejos de la lente que el objeto, el aumento lineal es igual á 10 y el superficial á 100.

451. **Microscopio solar.** — El *microscopio solar* es una especie de linterna mágica, iluminada por los rayos solares: éste es el tipo de los aparatos de proyección. Se le coloca en la ventana de la cámara oscura para hacer experimentos.

Descripción. — En un espejo plano M (fig. 469 y 470), que está fuera de la cámara oscura y que se puede manejar desde el exterior con un botón B, se reciben los rayos solares, para reflejarlos en la dirección de una lente convergente *l;* ésta los concentra en otra *o* (fig. 469), que á su vez las reune en un foco.

El conjunto de las lentes *l* y *o* forma lo que se denomina *condensador de luz.* El objeto cuya imagen se desea obtener es colocado cerca del foco de este sistema, á fin de iluminarlo bien. Dispónesele entre dos láminas de vidrio, bien mantenidas á su vez entre dos metálicas *m*, por un muelle cilíndrico *n*. Una vez bien iluminado de esta manera el objeto, se le coloca muy cerca del foco de un sistema convergente, compuesto de tres lentes *x*; éstas suministran una imagen *ab*, invertida y muy aumentada, que va á pintarse en una pared ó en una pantalla blanca situada á distancia conveniente. Dos tornillos de botón C y D sirven para graduar las distancias de

las lentes o y x al objeto, de manera que éste se encuentre exactamente en el foco de la primera, y que la imagen suministrada por las lentes x se proyecte exactamente sobre la pantalla.

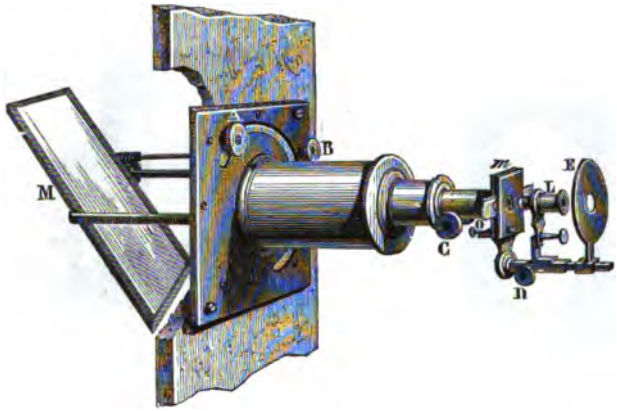


Fig. 469.

Aumento. — Se le determina colocando en lugar del objeto un micrómetro de $\frac{1}{10}$ ó de $\frac{1}{100}$ de milímetro. Mídese directamente en la imagen el intervalo aumentado de dos de estas divisiones y se

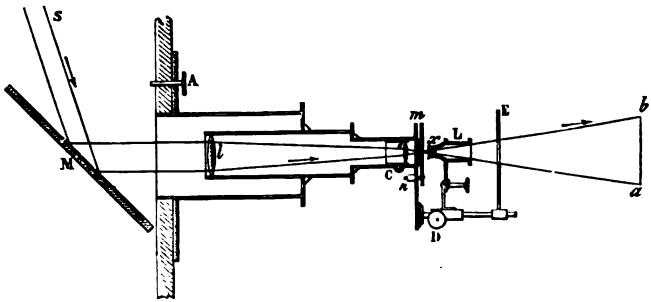


Fig. 470.

le divide por el intervalo real : el cociente es, *por definición*, el aumento. El objetivo x está formado por una, dos ó tres lentes, todas acromáticas, según el aumento que se trata de obtener.

Observaciones. — *Uso del heliostato.* — Como la dirección de la luz solar varía constantemente, hay que cambiar á cada instante la posición del espejo exterior, á fin de que los rayos reflejados vayan siempre en dirección del eje del microscopio. Este resultado no podría obtenerse rigurosamente más que con ayuda de un *heliostato.* Se le alcanza aproximadamente por medio del doble movimiento que se puede imprimir al espejo M desde dentro de la cámara oscura : primero, una rotación del espejo M alrededor de un eje paralelo al plano del espejo, me-

diante un tornillo sin fin y un piñón B (fig. 469); en segundo lugar, una rotación alrededor del eje general del instrumento con ayuda de un botón A, que se mueve en una corredera fija y transmite su movimiento al espejo.

2°. *Uso de una pantalla de alumbre.* — El microscopio solar presenta el inconveniente de concentrar sobre el objeto calor muy intenso que lo altera con rapidez. Remédiasele interponiendo agua saturada con alumbre, que detiene parte del calor, gracias á su *atermaneidad* (opacidad para el calor).

452. **Linternas de proyección.** — *Aparato Molteni.* — El *microscopio solar* no puede servir más que en el caso particular en que se puede disponer de la luz solar. En el caso general no se puede efectuar proyecciones más que por medio de un foco de luz artificial, tal como la *luz Drummond* ó la *eléctrica :* entonces se emplean *linternas ó aparatos de proyección.* El que representa la fig. 471 es uno de los más perfectos; lo construyó Molteni. Actualmente está dispuesto para la luz Drummond [1], pero es posible arreglarlo para funcionar con un arco voltaico.

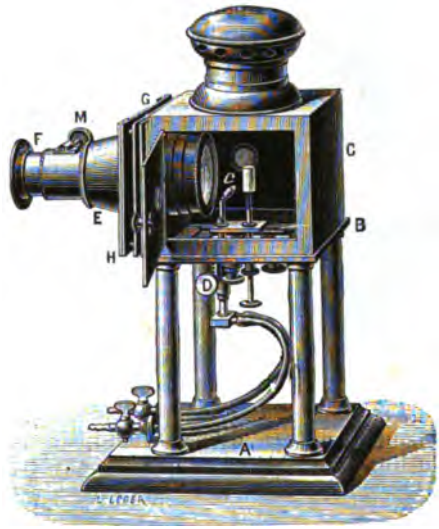


Fig. 471.

El soplete de gas oxhídrico *c* está sostenido por planchas de cobre reunidas, provistas ambas de un mecanismo de cremallera, que permite mover poco á poco el soplete, sea de derecha á izquierda, sea de delante atrás. Otra cremallera D permite el movimiento en el sentido vertical, de modo que es fácil afocar el manantial de luz respecto de los sistemas refringentes de la linterna.

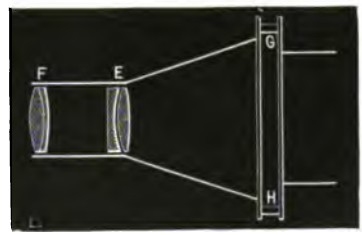


Fig. 472.

Hay dos de éstos : el *condensador de luz,* compuesto de tres lentes, y el cono de proyección E, ordinariamente formado por dos lentes acromáticas E y F (fig. 472); su armadura es independiente del

1. Sábese que esta luz se obtiene mediante una barra de cal, puesta incandescente por la llama de un soplete doble de gaz oxígeno é hidrógeno.

condensador, de modo que se puede retirarlo ó ponerlo en el aparato, según se quiera, para proyectar un haz de luz paralela ó convergente. La cremallera M permite modificar la distancia del objetivo al marco colocado en la corredera GH. Por lo demás, el objetivo es independiente del porta-cremallera, donde entra rozando y del cual se le puede retirar á voluntad. También se puede retirar el cono; la corredera GH, que permanece unida al aparato puede recibir las diversas piezas ó clichés que se trata de proyectar.

Fig. 473.

Observaciones. — 1°. Cuando el aparato debe funcionar á voluntad, sea con la luz Drummond, sea con el arco voltaico, las placas móviles se colocan en la peana A, en vez de estar sobre las columnas; entonces puedan recibir sea un soplete, sea un regulador.

2°. *Montante de reflexión total.* — En ciertos casos no se pueden colocar los objetos que se trata de proyectar sino en posición horizontal. Entonces se retira el cono de proyección E y se le reemplaza por un *montante de reflexión total* MEM' (fig. 473). Este aparato se compone de un primer espejo M, inclinado 45°, que recibe los rayos procedentes del condensador; éstos se refractan en el objetivo propiamente dicho E, desde el cual inciden sobre un segundo espejo M', inclinado también 45°, que los envía entonces horizontalmente y proyecta la imagen sobre la pantalla vertical.

453. Polioramas ó aparatos de vistas fundentes. — Cuando se proyecta un dibujo con los aparatos ordinarios, hay que retirarlo de la linterna para poner otro. Durante este cambio se debe, sea cerrar el objetivo, sea dejar la pantalla en plena luz: el efecto es desagradable en

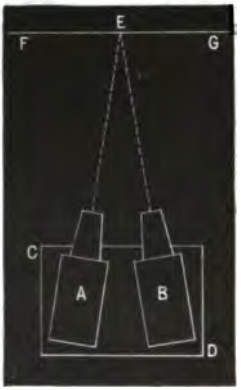


Fig. 474.

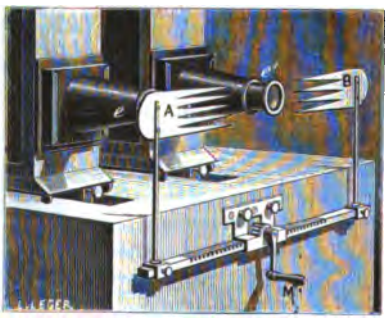


Fig. 475.

ambos casos. Molteni suprime este inconveniente estético empleando aparatos especiales llamados *polioramas*, donde las proyeccionnes se suceden sin interrup-

ción, fundiéndose por decirlo así, unas en otras. He aquí el principio de un poliorama de proyección doble.

Supongamos dos linternas A y B (fig. 474), dispuestas ambas en una misma tabla CD, con la cual están articuladas de manera que pueden hacer converger sus rayos luminosos hacia una misma región E de la pantalla FG. Pongamos, por ejemplo, en la linterna A un paisaje de verano, y en la B el mismo paisaje visto en invierno. Estando el diafragma A enteramente abierto al principio y el de B cerrado, lo que se observa en la pantalla es la vista de verano. Pero si se cierra progresivamente el diafragma A mientras se abre la misma cantidad el B, se ve desaparecer progresivamente el paisaje de verano, mientras va ocupando su lugar en la pantalla, poco á poco también, el de invierno. En resumen, las vistas *se han fundido* una en otra, sin que el espectador, situado por la otra parte de la pantalla, haya podido darse cuenta de cómo se produjo el efecto.

Disolutor inglés. — Para obtener este curioso efecto se pueden utilizar diversas combinaciones. En el *disolutor inglés* (fig. 475) va pasando delante de uno de los objetivos *c* una lámina dentada A, mientras que otra análoga B descubre simultáneamente el otro objetivo *c'*. Este doble movimiento se ejecuta desde fuera por medio de un tornillo de manubrio M.

En vez de colocar los dos aparatos uno al lado de otro horizontalmente, se prefiere sobreponerlos. El aparato doble vertical (fig. 476) es el que Molteni

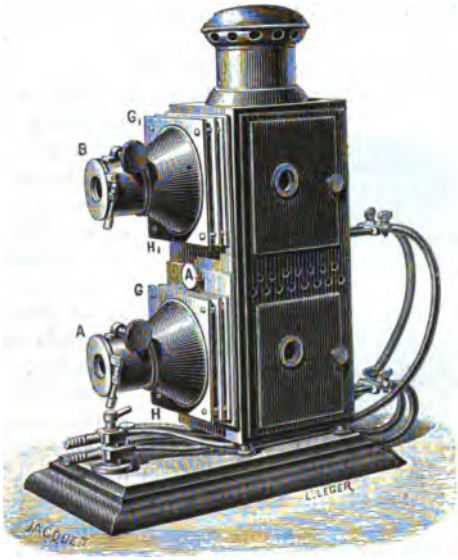


Fig. 476.

utiliza generalmente, pues ocupa menos sitio, es más fácil de transportar y, sobre todo, presenta la ventaja de permitir al operador el manejo simultáneo, sin cambiar de sitio, de los dibujos de ambos aparatos [1].

Observación. — También se hacen polioramas de tres, cuatro y hasta cinco linternas ; pero en la práctica el de dos, que acabamos de describir, es suficiente.

1. El lector que desee estudiar el manejo de estos aparatos hará bien en consultar la obra especial de Molteni titulada : *Instructions pratiques sur l'emploi des appareils de projection.*

CAPÍTULO VI

VISIÓN [1].

454. **Estructura del ojo humano.** — El *ojo* es el órgano de la *visión*. Ésta es el fenómeno en virtud del cual la luz emitida ó reflejada por los cuerpos produce en nosotros la sensación que nos revela su presencia.

El ojo se encuentra situado en una cavidad llamada *órbita* y está mantenido por los *músculos* que sirven para moverlo, por el *nervio óptico*, la *conjuntiva*, los *párpados* y la *aponeurosis órbito-ocular*. Estas diversas partes lo mantienen sólidamente, pero le permiten al mismo tiempo movimientos muy variados y extensos. Su volumen es casi idéntico en todos los individuos; sólo la abertura de los párpados, que es variable, es la que los hace aparecer más ó menos voluminosos.

Su forma general es la de un esferoide de mayor curvatura en la parte anterior que en la posterior. Está compuesto de varias membranas y medios, análogos á las diversas piezas de un instrumento óptico (fig. 477). Son : la *córnea*, la *esclerótica*, el *iris*, el *humor acuoso*, el *cristalino*, el *humor vítreo*, la *membrana hialoide*, la *retina*, la *coroide* y el *nervio óptico*.

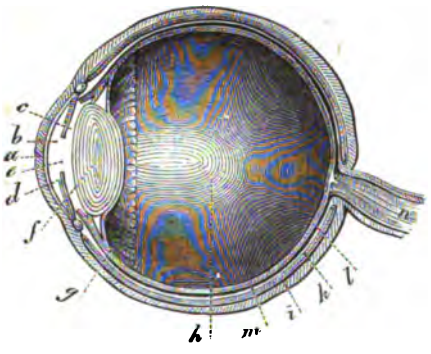


Fig. 477.

Córnea. — La córnea *a* es una membrana transparente situada delante del globo del ojo. Tiene sensiblemente la forma de un pequeño casquete esférico de 11 á 12 milímetros de diámetro y un radio de curvatura de 8 milímetros. Su circunferencia, cortada en bisel á expensas de la cara externa, se engarza en la esclerótica *i*, y la adherencia de estas dos membranas es tan grande que algunos anatómicos la han considerado como una sola.

Esclerótica. — La esclerótica *i* es una membrana blanca que envuelve en unión de la córnea todas las partes constituyentes del ojo. Presenta en la parte anterior una abertura casi circular donde

1. Este capítulo ha sido revisado por el Dr. Javal, director del laboratorio de oftalmología de la Escuela de estudios superiores (Sorbona), miembro de la Academia de Medicina.

está engarzada la córnea; en la posterior é interna está perforada para dar paso al nervio óptico.

Iris y *niña.* — El iris *d* es un diafragma anular, opaco, adherente por su perímetro exterior, y libre por su borde central. Esta membrana se encuentra situada entre la córnea y el cristalino. Ella es la que forma la parte coloreada del ojo; se encuentra taladrada, no en su centro, sino algo hacia dentro por una abertura que se llama *pupila* ó *niña del ojo* y que en el hombre es *circular*. Algunos animales la tienen estrecha y prolongada en sentido *vertical*, particularmente los del género *felis*, y en el *transversal* los rumiantes.

Los rayos luminosos penetran en el ojo por la pupila. Su diámetro, variable para un mismo individuo, es de 3 á 5 mm. por término medio; pero pueden traspasarse esos límites. Las alternativas de ensanche y contracción de la pupila se efectúan rápidamente; son muy frecuentes y desempeñan papel importante en el fenómeno de la visión. La pupila se contrae bajo la acción de viva luz; por el contrario, en la oscuridad se dilata. Los movimientos del iris son *involuntarios*.

De manera que esta membrana es una pantalla de abertura variable, cuya función es regular la cantidad de luz que penetra en el ojo. El iris sirve también para corregir la aberración de esfericidad, impidiendo que los rayos marginales atraviesen los bordes del cristalino: hace en el ojo lo que los diafragmas en los instrumentós de óptica.

Humor acuoso. — Entre la parte posterior de la córnea y la anterior del cristalino hay un líquido transparente que se llama *humor acuoso*. El espacio *e* ocupado por este humor parece dividido por el iris en dos regiones; una, *b*, comprendida entre la córnea y el iris, se denomina *cámara anterior;* la otra *c*, situada entre el iris y el cristalino, es la *cámara posterior;* pero la existencia de esta última es dudosa.

Cristalino, cápsula del cristalino, humor de Morgani. — El cristalino es un cuerpo lenticular *f*, situado detrás del iris y en contacto con esta membrana. Es notable por su transparencia y está envuelto en una membrana, diáfana como él, que se llama su *cápsula*, y que adhiere por su borde á la corona anular formada por los *procesos ciliares g*. Su cara anterior presenta convexidad menor que la cara posterior, y su tejido se compone de una serie de placas casi concéntricas, más duras en el centro que en la circunferencia. Las capas más superficiales son tan blandas, que casi se encuentran en estado líquido. Se les ha dado el nombre de *humor de Morgani*. Su poder refringente disminuye del centro á la periferia [1].

Humor vítreo, membrana hialoide. — Llámase *humor vítreo* ó *cuerpo*

1. *Operación de la catarata.* — El *cristalino* puede volverse *opaco* por efecto de la enfermedad llamada *catarata*. La operación para curarla consiste en extraer por diversos medios quirúrgicos ese órgano que se ha convertido en obstáculo á la entrada de la luz.

vítreo á una masa transparente, comparable á la albúmina del huevo, que ocupa toda la parte *h* del ojo situada detrás del cristalino. El humor vítreo está envuelto por la *membrana hialoide l*, que tapiza la cara posterior de la cápsula cristalina y toda la cara interna de otra membrana llamada *retina*.

Retina, nervio óptico, mancha amarilla (*macula lutea*) y *fovea centralis*. — La retina *m* es una membrana destinada á recibir la impresión de la luz y á transmitirla al cerebro por mediación de un nervio *n*, llamado *nervio óptico*, que se extiende sobre aquella á manera de red y la pone en comunicación con el cerebro. La parte más sensible de la retina recibe el nombre de *mancha amarilla* ó *macula lutea*. En el centro de esta mancha, denominado *fovea centralis* está el máximum de sensibilidad.

Observaciones. — 1°. La retina y el nervio óptico no tienen más que la propiedad especial de recibir y transmitir al cerebro la impresión de las imágenes. La herida de estos órganos es causa de sensaciones luminosas.

2°. *Rojo retiniano*. — El descubrimiento del *rojo retiniano*, efectuado por Boll, demuestra que en la retina se producen fenómenos químicos que hacen más completa todavía la asimilación clásica del ojo á una cámara oscura fotográfica.

Coroide, procesos ciliares. — La *coroide k* es una membrana interpuesta entre la retina y la esclerótica; es esencialmente vascular y está cubierta, sobre todo en su cara interna, de una materia negra, semejante al pigmento de la piel de los africanos, y que tiene como destino absorber los rayos que no deben cooperar á la visión.

La coroide se prolonga hacia la parte delantera formando una serie de pliegues salientes *g*, llamados *procesos ciliares*, que penetran entre el iris y la cápsula cristalina, á la cual se adhieren, formando en torno suyo un disco comparable al de una flor radiada.

Índices de refracción de los medios transparentes del ojo. — Los índices de refracción de los medios transparentes del ojo han sido determinados por Brewster. Los hemos reunido en el cuadro siguiente, con el del agua para término de comparación.

Agua.	1,3358	Envoltura exterior del cristalino. .	1.3767
Humor acuoso.	1.3366	Centro del cristalino.	1,3990
Humor vítreo.	1,3394	Índice medio del cristalino. . . .	1,3839

455. **Marcha de los rayos en el ojo.** — Este órgano puede compararse á una cámara oscura en que la niña fuera la abertura, la córnea y el cristalino la lente convergente y la retina la pantalla donde va á pintarse la imagen.

Sea, en efecto, un objeto AB (fig. 478) colocado delante del ojo, y consideremos los rayos emitidos desde un punto cualquiera A de este objeto hacia el órgano. Al entrar en la córnea experimentan una primera refracción que los acerca al eje O *o*, trazado por el centro óptico del cristalino ; después tropiezan con el cristalino, que los

refracta de nuevo como una lente biconvexa; y finalmente, después de haber sufrido una última refracción en el humor vítreo, van á reunirse en un punto *a*, formando allí la imagen de A. Como los

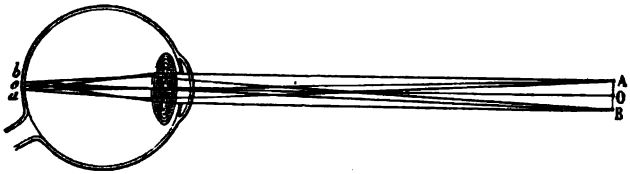


Fig 478.

rayos que emite el punto B van análogamente á formar en *b* la imagen de este punto, resulta una imagen *ab* muy pequeña, real é invertida, que si el ojo tiene estructura normal, va á formarse exactamento en la retina.

456. **Linea visual. — Ángulo de las lineas visuales. — Ángulo visual.** — Llámase *línea visual* á la que une el punto luminoso que se mira con la *fovea centralis;* esta línea no coincide exactamente con el eje de figura del ojo.

Se llama *ángulo de las líneas visuales* al *f* A *f'* (fig. 479) formado

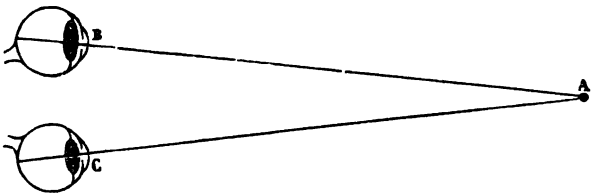


Fig. 479.

por las dos líneas visuales que corresponden á un mismo punto uminoso A.

El *ángulo visual* ó *diámetro aparente* de un objeto AB es el ángulo AOB (fig. 480) bajo el cual se ve este objeto; está formado por las

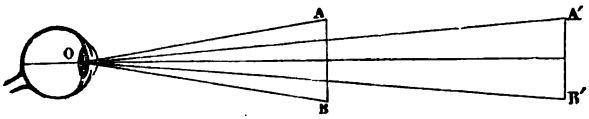


Fig. 480.

líneas visuales OA y OB. Para una misma distancia, este ángulo crece con la magnitud del objeto y, dado el mismo objeto, disminuye cuando la distancia aumenta. De ahí resulta que los objetos parecen tanto más pequeños cuanto más lejos están; pues como los ejes

secundarios AO y BO se cruzan en el centro del cristalino, la magnitud de la imagen proyectada sobre la retina depende de la abertura del ángulo visual AOB.

457. **Apreciación de la distancia y de la magnitud de los objetos.** — La apreciación de la distancia y la de la magnitud dependen de varios elementos : el ángulo visual, la comparación con los objetos de magnitud conocida y la disminución de claridad de la imagen por interposición de una atmósfera más ó menos vaporosa.

Cuando la magnitud de un objeto es conocida, como la estatura de un hombre, la altura de un árbol ó de una casa, se aprecia la distancia por la abertura del ángulo visual bajo que se le ve. Si la magnitud del objeto es desconocida, se la estima por comparación con los objetos que la rodean.

Una columnata, una alameda de árboles nos parecen disminuir de magnitud á medida que su distancia aumenta, porque el ángulo visual decrece ; pero la costumbre de ver columnas y árboles con la altura que les conviene, hace que nuestro juicio rectifique la apariencia debida á la visión. Análogamente, aunque las montañas muy distantes sean vistas bajo un ángulo muy pequeño y ocupen sólo pequeño espacio en el campo de la visión, les devolvemos instintivamente su magnitud real porque estamos acostumbrados á los efectos de perspectiva aérea.

458. **Visión única con los dos ojos ó visión binocular.** — Cuando los dos ojos se fijanen un mismo objeto, se forma en cada retina una imagen, y sin embargo no vemos más que una. La explicación más plausible de la visión única con los dos ojos es la de Brewster, quien atribuye la unidad de sensación á la costumbre que adquirimos de referir á una misma cosa las impresiones simultáneas de nuestras dos retinas.

He aquí los hechos principales que se notan en la visión *binocular :*

1°. Se ve mejor con los dos ojos que con uno solo. En efecto, si se mira un objeto primeramente con un ojo solo y después con los dos, es manifiesta la diferencia de claridad.

2°. Cuando los dos ojos están fijos cada uno en un objeto diferente, de modo que los dos ejes ópticos se reunan allende ó aquende esos objetos, pueden producirse ilusiones de óptica muy notables. Por ejemplo, si se miran dos objetos

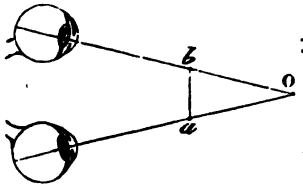


Fig. 481.

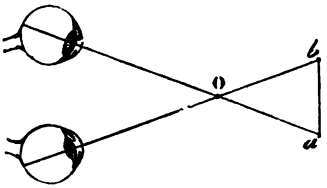


Fig. 482.

idénticos y de pequeñas dimensiones *a* y *b*, valiéndose de dos tubos aisladores que den á los ejes ópticos de los dos ojos las direcciones concurrentes *a*O y *b*O (fig. 481), no se ve más que un objeto único, pero más lejano ; parece situado en el punto de cruce O de los dos ejes.

Si el punto de cruce de éstos está delante de los que se miran (fig. 482), tampoco se ve más que un objeto, pero más cercano, en el punto O.

Estos diversos experimentos demuestran que las impresiones son simultáneas en los dos ojos, y se sobreponen para dar una sensación única.

459. **Causa del relieve aparente de los objetos. — Estereoscopio.** — De algunos experimentos de Wheatstone resulta que la visión binocular es la única que puede dar una percepción clara del *relieve* de los cuerpos, esto es, de sus tres dimensiones. Hasta es cierto que con un solo ojo el relieve no nos parece apreciable sino porque los objetos que miramos nos son generalmente conocidos y porque *interpretamos* sus sombras. Wheatstone ha probado de manera experimental que

el relieve aparente de los cuerpos resulta de la percepción simultánea de estas dos imágenes. Para ello ideó en 1838 el *estereoscopio*[1], aparato mediante el cual se ven con su relieve en una superficie plana las imágenes de objetos de tres dimensiones.

Principio del instrumento. — Colócase delante de cada ojo una imagen diferente de un mismo objeto, una con la perspectiva correspondiente al ojo derecho, y la otra con la que corresponde al ojo izquierdo, cuando miran este objeto á pequeña distancia. Si entonces se dispone el aparato de manera que cada ojo no vea sino la imagen que le está destinada, las dos imágenes se sobreponen; entonces es evidente que debe formarse en cada retina exactamente la misma imagen que si se mirara el objeto mismo. Y en efecto, así se obtiene una percepción tan clara y distinta del relieve, que la ilusión es completa y sorprendente.

La superposición de las dos imágenes se obtenía en el estereoscopio construído por Wheatstone mediante la reflexión en dos espejos planos. Brewster la realizaba sirviéndose de dos lentes convergentes idénticas[2].

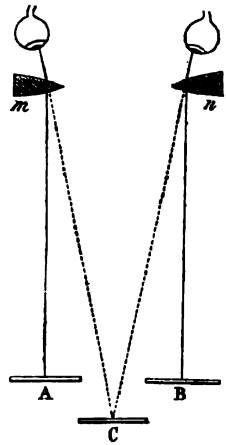


Fig. 483.

Marcha de los rayos. — En A y B se encuentran los dibujos que los dos ojos deben mirar separadamente. Encima se encuentran dos lentes *m* y *n*, que son respectivamente los oculares de los dos ojos. Ahora bien, los rayos emanados de dos puntos homólogos de las imágenes se refractan á su paso por estas lentes y toman las mismas direcciones que si hubieran salido de un punto único C. De modo que ahí es donde se sobreponen las imágenes virtuales de los dibujos A y B, y donde el objeto aparece con relieve de perfecta fidelidad.

460. **Región insensible de la retina. — Punctum cæcum.** — La retina no es igualmente sensible en todas sus partes, según prueba la siguiente experiencia, que se debe á Mariotte. Márcanse dos puntos negros sobre papel blanco, á unos cuantos centímetros de distancia uno de otro, y después, acercando mucho el papel al ojo, se mira fijamente el punto de la izquierda con el ojo derecho cerrando el izquierdo, lo que no impide ver el otro punto; pero si se aleja lentamente el papel, el punto de la derecha desaparece en el momento en que se llega á cierto alejamiento, para volver á presentarse si se continúa retirando el papel. Lo mismo ocurre cuando se mira el punto de la derecha con el ojo izquierdo.

Mariotte observó que en el momento en que el punto deja de ser visible, su imagen se proyecta sobre la inserción misma del nervio óptico. Á ese punto que parece insensible á la acción de la luz se le ha dado el nombre de *punctum cæcum.*

461. **Persistencia de la impresión en la retina.** — Cuando se hace dar vueltas rápidas á un carbón incandescente, se observa como una

1. Del griego σκοπεῖν, y στερεός, que significa *ver sólido.*
2. Brewster realizaba esta identidad cortando en dos una lente biconvexa, y colocando la mitad recta delante del ojo izquierdo, y luego la mitad izquierda delante del derecho (fig 483).

cinta continua de fuego; análogamente, la lluvia que cae en forma de grandes gotas aparece en el aire como una serie de filetes líquidos. Estas diferencias aparentes se deben á que la impresión de las imágenes en la retina sigue persistiendo después que el objeto que la produce ha desaparecido ó se ha movido. La duración de esta persistencia varía con la intensidad de la retina y la intensidad de la luz. Plateau ha observado que es próximamente de medio segundo.

La impresión de los colores persiste lo mismo que la de la forma de los objetos; pues si se hace dar vueltas á círculos divididos en sectores pintados de diversos colores, entonces se confunden éstos produciendo la sensación que resultaría de su mezcla. El azul y el amarillo dan el verde; el amarillo y el rojo el anaranjado; el azul y el rojo el violado; y la serie de los siete colores del espectro produce el blanco (disco de Newton, 412,5°).

Existen varios aparatos interesantes cuyos efectos se explican por la persistencia de la sensación en la retina. Tales son el *taumatropo*, el *fenakisticopio*, la *rueda de Faraday* y el *caleidófono*.

462. **Contraste de los colores. — Ley de Chevreul.** — El *contraste de los colores* es una reacción recíproca entre dos colores cercanos, de donde resulta que á cada uno de ellos se añade el color complementario del otro. Este contraste fué observado por Chevreul, que lo estudió profundamente, indicando su ley.

Chevreul descubrió que si se yuxtaponen los colores rojo y anaranjado, el rojo tira á violado y el anaranjado á amarillo. Con el rojo y el azul, el primero tira á amarillo y el segundo á verde; con el amarillo y el azul, el primero tira á anaranjado y el azul á índigo; y así sucesivamente para gran número de combinaciones. Concíbese cuánto interesa en la fabricación de las telas y tapices saber apreciar el efecto debido al contraste de los colores.

463. **Distancia de la visión distinta.** — Llámase *distancia de la visión distinta* aquella á que deben colocarse los objetos para ser distinguidos con claridad. Si el poder refringente del ojo fuera invariable, no habría más que una distancia única para que los objetos exteriores formasen una imagen clara en la pantalla retiniana; cada individuo tendría, pues, una *sola distancia de la visión distinta*. Sin embargo, la experiencia prueba que el ojo puede *ver claramente* á distancias muy variables, partiendo de una mínimum, que se debería llamar *punctum proximum* y que en general se denomina *distancia mínimum de la visión distinta*. Varía con los individuos y en ocasiones, para el mismo individuo, de un ojo á otro.

Sin embargo, podemos ver claramente á distancias muy desiguales; pero no simultáneamente. En efecto, si se mira á través de un velo de gasa situado á 20 á 30 centímetros del ojo, es posible ver claramente, según se quiera, pero unos después de otros, ya el velo, ya los objetos lejanos. Luego, cuando el ojo está dispuesto para ver á cierta distancia, no lo está para otra; pero puede adaptarse sucesivamente á ambas.

464. **Acomodación.** — Esta *adaptación del ojo* á distancias variables no puede efectuarse más que por una especie de afocamiento espon-

táneo de la pantalla retiniana respecto de los objetos exteriores diversamente alejados. Ahora bien, como la distancia del fondo del ojo, quiere decir de la pantalla á la córnea es constante, el afocamiento no puede efectuarse sino por una modificación en el poder refringente del sistema dióptrico del ojo. Este afocamiento *espontáneo* es lo que se llama *acomodación ó adaptación*. Consiste en un aumento de convexidad del cristalino, producido por la contracción de los procesos ciliares, músculos que lo abarcan circularmente. El cristalino se pone tanto más abombado cuanto más se contrae el músculo ciliar. Cuando el músculo está muy flojo, la acción refringente del cristalino es escasa; alcanza su máximum al mismo tiempo que la contracción del músculo [1].

465. **Vista normal. — Ojo emmetropo.** — Se dice que el ojo es *emmetropo* [2] cuando está dotado de vista *normal*. Las dimensiones de su aparato dióptrico son tales que los objetos lejanos van á pintarse claramente en la retina cuando el músculo de la acomodación está en reposo. La imagen de los objetos más ó menos cercanos no se efectúa de modo preciso en ella, sino gracias á un *esfuerzo de acomodación* más ó menos grande, que da al cristalino el poder convergente necesario para el afocamiento.

El *punctum remotum*, quiere decir el más lejano de la visión distinta está *en lo infinito* para un ojo emmetropo. Prácticamente, la distancia de los objetos visibles está limitada por la necesidad de producir en la retina imágenes que no sean ni demasiado pequeñas, ni demasiado débiles para impresionar el nervio óptico : de manera que su distancia máxima depende al mismo tiempo de su tamaño y de su brillo. Cuanto al *punctum proximum*, sólo depende de la fuerza acomodatriz de que el ojo puede disponer : está tanto más cerca cuanto más flexible es el cristalino y más fuerte el músculo ciliar. El doctor Javal ha dado el nombre, hoy universalmente admitido, de *recorrido de la acomodación* á la distancia que separa al *punctum proximum* del *punctum remotum*.

Cuando se permanece en los límites del recorrido de la acomodación, la visibilidad de los objetos depende para un ojo emmetropo de la relación que existe entre su magnitud y su distancia. El ojo que puede distinguir letras de 1/4 de milímetro á 25 centímetros de distancia, leerá análogamente bien letras de 1 metro de alto á un kilómetro. Pero más allá del *punctum remotum* y aquende el *punctum proximum* deja de aplicarse esta regla de la visibilidad. Así es que ese mismo ojo emmetropo no leerá letras de 1/10 de milímetro, porque sería preciso acercarlas á 10 centímetros, esto es más acá del *punctum proximum* normal.

466. **Presbicia. — Espejuelos ó anteojos de vidrios convexos.** — Con la edad se va haciendo el cristalino menos flexible y menos

1. Dr. Javal, sur les maladies de l'œil, *Revue scientifique* del 27 de septiembre 1879.
2. Εν μέτρον, conforme á la medida, ωψ, ojo.

fuertes los músculos ciliares. De ahí resulta que la fuerza de acomodación del ojo disminuye y que el *punctum proximum* se aleja. Esta diferencia es gradual y alcanza, allá por los cuarenta ó cuarenta y cinco años, valor tal que los objetos mantenidos en la mano se encuentran entre el *punctum proximum* y el ojo. En este momento el ojo emmetropo se ha convertido en *ojo présbita*. Esta enfermedad de la vista es la *presbicia*.

Se remedia la presbicia, así como las demás enfermedades del ojo por medio de sencillos vidrios oculares, llamados *lentes*, *anteojos*, *espejuelos*, etc. En general se les fabrica de crow-glass. Son *convexos* ó *cóncavos* y ordinariamente *esféricos;* también se construyen desde hace algún tiempo vidrios *cilíndricos*. En estos vidrios se inscriben números que indican *en pulgadas* el radio de curvatura común á sus dos superficies. Tratándose de vidrios de crown, el valor del índice medio hace que este rayo sea expresado por el mismo número que la distancia focal principal [1]. De consiguiente, un vidrio de crown marcado nº 20 es un vidrio de 20 pulgadas de foco ó de 20 de curvatura [2].

Los présbitas usan *anteojos de vidrios convexos*. En efecto, la convexidad del vidrio se añade á la del cristalino corrigiendo la falta de poder convergente, y el *punctum proximum* se acerca suficientemente para permitir la lectura cuando los vidrios han sido escogidos bien.

Pero este remedio no deja de tener inconvenientes, pues todo el recorrido de la acomodación se encuentra transportado al mismo tiempo, y el *punctum remotum* se acerca al mismo tiempo que el *proximum :* así es que el présbita no puede ver claramente con sus anteojos los objetos lejanos á través de sus anteojos, sino que ha de mirar por encima.

Hay notable conexión entre la edad del présbita y el grado de presbicia. En efecto, la edad de un individuo *emmetropo* puede deducirse con tres ó cuatro años de diferencia de la distancia de su *punctum proximum*. Además, los diversos números de vidrios convexos 48, 24, 16, 12, 10 corresponden generalmente á las edades de 48, 54, 60, 66, 72 y 78 años.

467. **Miopia. — Espejuelos ó anteojos de vidrios cóncavos.** — El *ojo miope* está caracterizado anatómicamente por un diámetro anteroposterior *mayor* que el del ojo emmetropo. De esta prolongación más

1. En efecto, si en la fórmula del *poder convergente* (395) se hace $R = R'$ y $n = \frac{3}{2}$, resulta $\frac{1}{f} = \frac{1}{R}$.

2. También se cuenta por *dioptrías*, dando este nombre á la *inversa de la distancia focal principal*, calculada en metros : así, una lente de 0,25 m. de distancia focal tendrá 4 *dioptrías*. Pásase de los números antiguos N, á los nuevos D sentando que $ND = 38$, ó que $ND = 40$. Lo primero equivale á admitir que el metro vale 38 pulgadas. La segunda corrige además el error procedente de que el índice del vidrio no es exactamente, 1.5, según se admitía en la antigua numeración.

ó menos exagerada del órgano resulta una reducción más ó menos fuerte del recorrido de la acomodación : el *punctum remotum* no se encuentra ahora en lo infinito, sino á distancia más ó menos corta y el *punctum proximum* está mucho más cerca del ojo miope que de un ojo emmetropo de la misma edad. El Dr. Javal llama *miopia ligera* á aquella en que el *punctum remotum* está más allá de 33 centímetros, *miopia media* la comprendida entre 33 y 10 centímetros, y *miopia fuerte* aquella en que la distancia máxima de la visión distinta es inferior á 10 centímetros.

Como la pantalla retiniana está á mayor distancia del aparato dióptrico del ojo, la imagen clara de los objetos lejanos debe formarse delante de la retina ; las cosas ocurren como si el ojo tuviera exceso de poder convergente. Compréndese pues que sea posible corregir esta enfermedad por el uso de espejuelos *de vidrios cóncavos*, que disminuyen la convergencia de los rayos luminosos que penetran en el ojo y les permiten ir á formar sus focos en la retina.

La miopia no es, como la presbicia, una sencilla enfermedad que se desarrolla con la edad, de manera regular y por decirlo así independiente del uso de espejuelos. Es una *enfermedad del ojo*, tanto más peligrosa cuanto que se desarrolla lentamente sin dolor y *de manera progresiva* si no se la atiende, hasta que el alargamiento gradual del globo ocular y la dilatación de la retina que de ahí resulta suprimen la percepción de las imágenes claras, tanto para los objetos próximos como para los lejanos.

Observemos además que las personas afectadas de miopia ligera pueden volverse présbitas. Basta para ello, que su *punctum proximum* vaya á encontrarse con su *punctum remotum*, que dista más de 33 centímetros. Esto puede ocurrir naturalmente con los años, por efecto de una disminución gradual en el recorrido de la acomodación. En este caso no se podrá obtener la visión clara de los objetos muy cercanos más que por medio de vidrios convexos.

468. **Hipermetropia.** — Esta es una enfermedad causada por una deformación anatómica exactamente opuesta á la que constituye la miopia : el *ojo hipermetropo* es más corto que el *emmetropo*. De ahí resulta una reducción del recorrido de la acomodación, no para los puntos alejados de la vista como en la miopia, sino para los inmediatos : el *punctum proximum* retrocede más ó menos, según el grado de la hipermetropía. La visión de los objetos lejanos queda pues siendo perfectamente clara, de modo que la enfermedad puede pasar del todo desapercibida cuando es poco intensa. Las personas ligeramente hipermetropas no corren más peligro que el de volverse présbitas algo más pronto que las emmetropas y salen del paso usando vidrios suficientes para los emmetropos de la misma edad. La hipermetropía, más ó menos fuerte, es por lo demás corregida de modo perfecto por el uso de los vidrios convexos, pues como éstos hacen más convergentes los rayos luminosos emanados de los objetos

vecinos permiten que la imagen vaya á formarse en la pantalla retiniana.

Los hipermetropos de alguna edad, sobre todo si su hipermetropía es fuerte, tienen gran ventaja en usar vidrios convexos para ver desde lejos.

469. **Astigmatismo.** — Éste es el defecto más común y el menos conocido del ojo. En todas las personas de vista mala ó delicada, en todos los miopes que no ven bien desde lejos, no obstante la ayuda de los vidrios cóncavos, en los présbitas que no logran descubrir anteojos convexos que les permitan leer sin cansancio, debe sospecharse que existe el *astigmatismo*[1]. También hay que buscarle en las personas que sufren de estrabismo ó bien de una simple desigualdad de fuerza en los dos ojos. Este defecto se traduce muchas veces por el lagrimeo, ó por inflamaciones del párpado y de la conjuntiva, rebeldes á toda especie de tratamiento.

La causa anatómica del astigmatismo es una *deformidad del globo ocular;* los medios refringentes del ojo *astigmata* no son sólidos de revolución en torno de su eje antero-posterior, sino que se les puede comparar con fragmentos de elipsoides de ejes desiguales.

De aquí la siguiente consecuencia fisiológica. Supongamos, por ejemplo, que un ojo emmetropo sufra ligero aplanamiento, de tal modo que su diámetro vertical se haga más pequeño que el horizontal: el ojo se volverá miope en el meridiano vertical, aunque siguiendo emmetropo en el horizontal: de modo que verá perfectamente las líneas verticales lejanas, mientras que las horizontales le parecerán menos claras. Este carácter del astigmatismo no es absoluto. Puede suceder que el defecto sea bastante grande en algunas personas para debilitar notablemente la vista, sin que éstas hayan notado nunca la desigual claridad de las líneas horizontales y de las verticales. El Dr. Javal ha demostrado poco hace que el cristalino en los jóvenes puede deformarse espontáneamente *de modo que compense el astigmatismo de la córnea.* Este descubrimiento explica porqué el astigmatismo pasa desapercibido tan frecuentemente, no obstante que es una causa grande de fatiga.

Espejuelos cilíndricos. — Oftalmómetro de Javal y Schiotz. — Es evidente que no se puede remediar esta enfermedad con vidrios esféricos, los únicos que de ordinario venden los ópticos, sino con otros que obren de manera diferente en los diferentes meridianos del ojo. El astigmatismo, descubierto por Tomás Young fué corregido al fin por el astrónomo Airy, mediante *vidrios cilíndricos.*

El doctor Javal ha demostrado que si se compara el ojo con un elipsoide de tres ejes desiguales, todo vidrio cilíndrico capaz de volver á la igualdad de refringencia los dos arcos situados en el plano perpendicular al eje antero-posterior, vuelve al mismo tiempo todos los restantes meridianos del ojo á poder refringente idéntico. La corrección del astigmatismo se obtendrá, pues, por el uso de un *vidrio cilíndrico apropiado.*

Este problema se resuelve con precisión y rapidez, al menos en el caso del astigmatismo córneo, por medio de un oftalmómetro inventado en 1881 por los doctores Javal y Schiotz.

470. **Diplopía.** — La *diplopía* es una enfermedad de la vista que hace ver dobles los objetos; es decir, en lugar de *uno,* se ven *dos.* La diplopía puede resultar de una parálisis de los músculos que ponen en movimiento los ojos, parálisis que tiene como consecuencia la imposibilidad de que los dos ojos converjan en el mismo punto. Esta enfermedad puede afectar solamente uno de los ojos. Este último caso se debe al astigmatismo irregular. Un solo ojo puede estar afectado de *triplopía* ó de *poliopía.*

471. **Acromatopsia** ó **Daltonismo.** — Llámase *acromatopsia* una singular afección que nos hace incapaces de juzgar los colores ó por lo menos algunos de ellos. Efectivamente, en algunas personas la insensibilidad es completa, mientras otras aprecian algunos colores. Los *daltónicos* (de Dalton, que indicó esta enfermedad)

1. Dr. Javal, *Des maladies de l'œil.*

distinguen muy bien los contornos de los cuerpos, las partes claras y las sombras; pero no los tonos.

472. **Oftalmoscopio.** — El *oftalmoscopio*[1] es un instrumento destinado á examinar el ojo. Compónese: 1°. de un reflector esférico cóncavo M, de vidrio ó de metal (fig. 484 y 485), de una distancia focal de 20 á 25 centímetros, y taladrado en su centro por un agujero de 2 milímetros de diámetro; 2°. de una lente convergente acromática *o*, que se mantiene delante del ojo que se trata de explorar; 3°. de

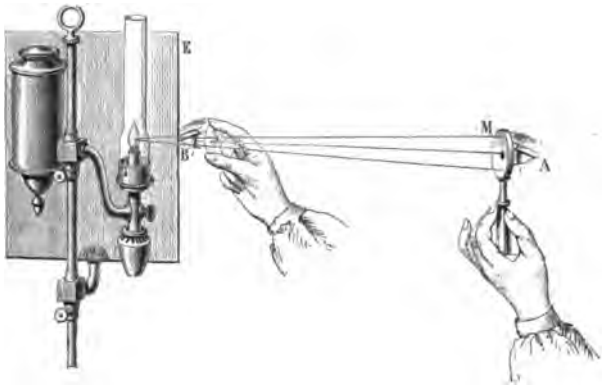


Fig. 484.

varias lentes, unas divergentes, otras convergentes, que se mantienen con unas pinzas detrás del espejo, á fin de corregir en caso necesario la vista del observador, si es miope ó présbita. El reflector M está taladrado en su centro por un agujero cuando es metálico; pero si es de vidrio no se hace más que raspar en la parte central la capa de estaño que cubre su cara posterior.

Uso. — Para servirse del oftalmoscopio, se coloca el sujeto en un cuarto oscuro y se pone á su lado una lámpara cuyo pie sostiene una pantalla E, destinada á interceptar la luz por la parte de la cabeza del sujeto, manteniéndola en la oscuridad.

Entonces el observador dirige con la mano el reflector M hacia el ojo B, concentrando en él la luz emitida por la lámpara, mientras que con la otra mano sostiene delante del ojo la lente *o*. Gracias á esta disposición, el fondo del ojo queda perfectamente iluminado y se distinguen muy bien sus lesiones.

La figura 485 indica una experiencia efectuada en el caso de un ojo miope. Sea primeramente el caso en que la lente *o* no está mantenida delante del órgano B: como los rayos que iluminan el fondo del ojo son rechazados hacia

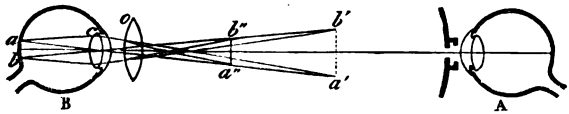


Fig. 485.

el cristalino *c*, lo atraviesan refractándose en él como en una lente y van á formar en *a'b'* una imagen aérea, real é invertida de la parte *ab* del fondo del ojo. Esta imagen es la que el observador ve por el agujero del espejo. Si se inter-

1. El oftalmoscopio, inventado por Helmholtz, está descrito minuciosamente en su *Óptica fisiológica*; puede consultarse ese hermoso libro en cuanto se refiere á la visión.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

pone la lente *o*, los rayos se refractan de nuevo el atravesarla, la imagen va á formarse en *a''b''*, más cerca del ojo enfermo, y, por consiguiente, es más clara y fácil de observar.

CAPÍTULO VII

NOCIONES DE ÓPTICA FÍSICA.

DOBLE REFRACCIÓN. — INTERFERENCIAS. — POLARIZACIÓN.

DOBLE REFRACCIÓN.

473. **Definiciones. — Preliminares.** — Ya se ha visto (376) que la *doble refracción* es la propiedad que tiene gran número de cristales, llamados *birrefringentes*, de emitir dos rayos refractados por uno solo incidente; de donde resulta que, cuando se mira un objeto á través de un cristal birrefringente, se ve una imagen doble del mismo (fig. 486).

Esta propiedad se observa aunque en grado desigual en todos los cristales que no pertenecen al sistema cúbico. Por el contrario, todos los cuerpos cristalizados

Fig. 486.

en este último sistema, y todas las sustancias amorfas, como el vidrio, no poseen la doble refracción. Sin embargo, pueden adquirirla accidentalmente, sea por el *temple*, sea por una compresión *disimétrica*.

Los líquidos y los gases no son nunca birrefringentes.

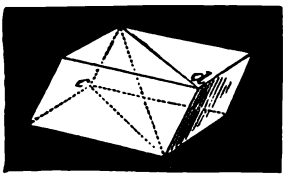


Fig. 487.

De todas las sustancias, la que presenta el fenómeno de la doble refracción del modo más aparente es el espato de Islandia (fig. 486).

474. **Ley de Brewster. — Cristales de un eje.** — En un cristal birrefringente hay siempre *una* ó *dos* direcciones según las cuales no se observa más que la refracción simple, quiere decir, según las cuales sólo se ve una sola imagen de los objetos. Estas direcciones se llaman *ejes ópticos* del cristal.

Llámase *cristales de un eje* los que no presentan más que una sola dirección según la cual no se bifurca la luz, y *cristales de dos ejes* los que presentan dos.

Los cristales de un eje más usados en óptica son el *espato de Islandia*, el *cuarzo* y la *turmalina*.

El espato tiene la forma de un romboedro cuyas caras se inclinen 105°,5 (fig. 487).

Las caras, en número de seis, son rombos que se reunen, tres á tres, por sus ángulos obtusos, en las extremidades de una recta *ab*, que es el eje *de cristalización*.

La figura 488 representa un ejemplar de cuarzo ó cristal de roca [1], cristalizado en el sistema romboédrico, en forma de un prisma exagonal de seis caras, coro-

Fig. 488.

nado por dos pirámides exagonales. La línea que une los dos vértices de las pirámides extremas es el *eje de cristalización*.

Brewster observó esta ley general : *En los cristales de un eje, el eje óptico coincide siempre con el de cristalización.*

Llámase *sección principal* de un cristal de un eje todo plano perpendicular á una cara natural ó artificial del cristal, que pasa por el eje óptico del cristal ó le es sencillamente

Fig. 489.

Fig. 490.

paralelo. La figura 489 representa el eje óptico AA' de un espato, y varias secciones principales, como ABA'B'.

Todo rayo luminoso que incide sobre el cristal, en una cualquiera de sus secciones, se bifurca en dos rayos refractados (fig. 491). Por el contrario, todo rayo luminoso que incidiera normalmente sobre una cara artificial, tal como ABC (fig. 490), tallada perpendicularmente al eje óptico NI, no se bifurcaría al refractarse, pues sería paralelo al eje óptico del cristal.

475. **Rayo ordinario y rayo extraordinario.** — De los dos rayos refractados que originan los cristales de un eje, uno sigue siempre las leyes de la refracción simple, pero el otro no está sometido generalmente á ellas. El primero se llama *rayo ordinario*, y el otro *rayo extraordinario*. Las imágenes que les corresponden

1. El *cuarzo* ó *cristal de roca* es ácido silícico (ó *sílice*) perfectamente puro y cristalizado.

se designan á su vez con los calificativos de *imagen ordinaria* y de *imagen extraordinaria.*

Puede hacerse patente este hecho de dos maneras :

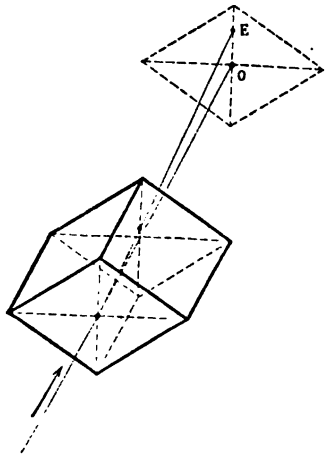


Fig. 491.

1°. Se hace incidir un rayo luminoso sobre un romboedro de espato y salen dos rayos, que van á marcar su paso en E y O sobre una pantalla (fig. 491). Cuando se hace girar el espato en torno del rayo incidente, uno de los rayos emergentes permanece inmóvil : este es el *rayo ordinario;* el otro gira al mismo tiempo que el cristal alrededor del primer rayo : este es el *rayo extraordinario.*

Supongamos que en un momento dado las dos imágenes se proyecten sobre una misma línea vertical (fig. 491) : si entonces se proyecta la cara del romboedro, se ve que la pequeña diagonal de este rombo es también vertical. Y si damos vuelta al espato de manera que las dos imágenes vayan á colocarse en una misma línea horizontal, seguimos observando que la pequeña diagonal coincide con la línea de las imágenes.

En todos los casos ocurre lo mismo : *la línea de las imágenes es siempre paralela á la pequeña diagonal de las caras atravesadas por la luz.* Este plano que pasa por las dos pequeñas diagonales de las dos caras opuestas del cristal es precisamente la *sección principal* del romboedro. Merece pues que se llame la atención sobre él, toda vez que contiene siempre los dos rayos.

476. **Cristales positivos y cristales negativos.** — El rayo ordinario y el extraordinario tienen índices diferentes : en ciertos cristales el índice del rayo ordinario es mayor que el otro ; en algunos pasa lo contrario. Fresnel llamó á los primeros *cristales negativos* y *cristales positivos* á los segundos.

El espato de Irlandia, la turmalina, el zafiro, el rubí, la esmeralda, la mica, el prusiato de potasa, el fosfato de cal, son *negativos;* el cuarzo, el circón, el hielo, la apofilita de un solo eje, son *positivos.* La clase de los cristales negativos es mucho más numerosa que la de los positivos.

477. **Leyes de la doble refracción en los cristales de un eje.** — El fenómeno de la doble refracción en los cristales de un eje está sometido á las leyes siguientes :

1°. *El rayo ordinario obedece siempre á las dos leyes generales de la refracción simple, sea cual fuere su plano de incidencia.*

2°. *En toda sección perpendicular al eje, el rayo extraordinario sigue también estas dos leyes como el ordinario; pero con un índice de refracción diferente del ordinario :* de donde la distinción de un *índice ordinario* y de un *índice extraordinario* en los cristales birrefringentes.

3°. *En toda sección principal el rayo extraordinario no obedece á la segunda ley de Descartes : los planos de incidencia y de refracción coinciden; pero la razón de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción no es constante.*

478. **Construcción de los rayos refractados : Regla de Huygens** [1]. — Á Huygens se debe una construcción geométrica ó *regla* de su nombre, que permite obtener gráficamente los dos rayos refractados, por medio del rayo incidente, en todas sus posiciones con relación al eje.

1°. *Caso de la refracción simple.* — Sea MM la superficie refringente, SI el rayo incidente, IN la normal (fig. 492). Describamos desde el punto I como centro dos esferas concéntricas, una de radio igual á la unidad, otra á $\frac{1}{n}$. (Estas dos esfe-

1. La exponemos en la forma simplificada que le dió el físico francés Billet.

ras son cortadas por el plano de figura siguiendo dos círculos concéntricos A y B). Prolonguemos el rayo incidente hasta su encuentro en A con la esfera de radio 1, y tracemos por A el plano tangente á la esfera (este plano tangente es cortado según la línea AT, tangente en A al círculo correspondiente). Llevemos desde el punto T un plano tangente á la esfera de radio $\frac{1}{n}$ (que es cortado por el plano de la figura según la línea TB, tangente al círculo B). Por fin, unamos el punto I con el de contacto B : *la línea* IB *es el rayo refractado que corresponde al rayo incidente* SI.

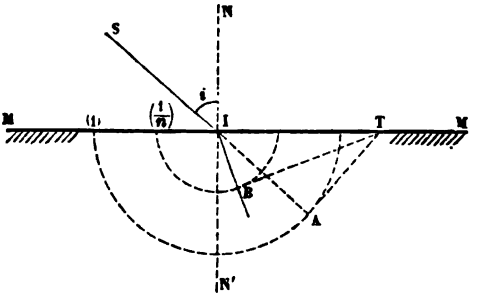


Fig. 492.

En efecto, en el triángulo ITB, que es rectángulo en B, el ángulo agudo en T es igual al ángulo de refracción BIN' y se tiene la relación

$$\text{IB}\left(\text{ó } \frac{1}{n}\right) = \text{IT sen BIN}'.$$

En el triángulo IAT, que es rectángulo en A, el ángulo agudo en T es igual al ángulo AIN', ó al ángulo i, y se tiene la relación

$$\text{IA (ó 1)} = \text{IT sen } i.$$

Dividiendo estas dos ecuaciones miembro á miembro resulta

$$\frac{\text{sen BIN}'}{\text{sen } i} = n;$$

luego el ángulo BIN' es igual al ángulo r, é IB es el rayo refractado que corresponde al rayo incidente SI.

Observaciones. — Siendo rigurosamente plana la construcción precedente, se puede enunciar de manera más sencilla la regla de Huygens, en el caso de la refracción simple :

Descríbense desde el punto I *como centro dos semi-círculos concéntricos uno de radio* 1 *y el otro de radio* $\frac{1}{n}$. *Prolóngase el rayo incidente hasta su encuentro en* A *con el primer círculo, tírase la tangente por el punto de intersección* A, *y desde el punto* T *en que esa tangente corta á esta superficie refringente, se dirige una tangente al segundo semi-círculo. El radio* IB, *dirigido al punto de contacto de esta última tangente es el rayo buscado.*

2°. *Caso general.* — En el caso de un medio birrefringente, la regla de Huygens se modifica del modo que sigue :

Desde el punto I *como centro se construye primero una esfera de radio* 1, *y después la superficie de la onda luminosa*[1], *que corresponde al medio refringente : se prolonga también el rayo incidente hasta su encuentro con la esfera, se traza el plano tangente á la esfera en* A ; *este plano va á cortar á la superficie refringente según una recta que se proyecta en* I *sobre el plano de la figura. Por fin dirígense siguiendo la recta* I *tantos planos tangentes como es posible á la superficie de la onda. Tantos cuantos sean los puntos de contacto, otros tantos rayos refractados habrá, uniendo aquellos puntos con el* I.

1. Se llama *superficie de la onda* al lugar de los puntos á donde las vibraciones luminosas del punto I llegan en el cristal, al cabo de la unidad de tiempo.

En el caso general se pueden dirigir dos planos tangentes, y hay por consiguiente dos puntos de contacto con la onda y dos rayos refractados, que corresponden al rayo incidente SI.

479. **Leyes de la doble refracción en los cristales de dos ejes.** — Los cristales de dos ejes son muy numerosos. (Ejemplos : sulfatos de nickel, de magnesio, de bario, de potasio y de hierro, azúcar, mica, topacio del Brasil, etc.). En estos diferentes cristales, el ángulo de los dos ejes toma valores muy diferentes, pues varía desde 3 á 90 grados.

Fresnel descubrió por el cálculo, demostrando después experimentalmente, que ninguno de los rayos refractados sigue las leyes de la refracción simple en los cristales de dos ejes. Sin embargo, llamando *línea media* y *línea suplementaria* á las bisectrices del ángulo de los dos ejes y de su suplemento, *en toda sección perpendicular á la línea media uno de los rayos refractados sigue las leyes de Descartes*, y *en toda sección perpendicular á la línea suplementaria el que sigue estas leyes es el otro rayo.*

INTERFERENCIAS.

480. **Principio de las interferencias. — Experiencia de los espejos de Fresnel.** — En óptica física se empieza por plantear una hipótesis sobre la naturaleza de la luz que sirve de principio y fundamento á toda la ciencia : es la *hipótesis de las ondulaciones*. Consiste en admitir que la luz es el resultado de un *movimiento vibratorio*, análogo al que produce el sonido, y definido matemáticamente por las fórmulas del *movimiento pendular* ó *vibratorio* [1]. Ahora bien, hemos visto en Acústica (324) que el carácter esencial de los movimientos vibratorios es la *interferencia*, quiere decir, la producción, por efecto de la combinación de las ondas, de *franjas de movimiento*, en las cuales el movimiento de vibración es máximum y de *franjas de reposo*, en las cuales el movimiento vibratorio es *nulo* ó *mínimo*. Así es que en Acústica se obtienen *franjas sonoras* y *franjas silenciosas*. Análogamente produciremos en Óptica, si la hipótesis de las ondulaciones tiene fundamento, *franjas luminosas* y *franjas oscuras*, separadas unas de otras en cada serie por el intervalo de una longitud de onda completa, y demostraremos esta curiosa proposición consecuencia directa de la hipótesis de las ondulaciones — que *luz añadida á luz produce oscuridad*.

La demostración experimental del *principio de las interferencias* (que deja mucho que desear en Acústica) es admirablemente clara en Óptica. Fresnel la realizó con el experimento clásico *de los dos espejos*.

Con el fin de tener dos focos luminosos perfectamente idénticos, Fresnel tomaba dos puntos *virtuales* s y s', obtenidos por la reflexión de un mismo punto luminoso real S, en dos espejos planos M y N, débilmente inclinados uno sobre otro (fig. 493). Este foco de luz S era *monocromático;* pongamos por ejemplo una luz roja. Si uno cualquiera de los haces reflejados va á incidir solo sobre una pantalla colocada en la cámara oscura, la iluminación es uniforme; pero si los dos haces reflejados caen simultáneamente sobre el lienzo, como en gran parte se sobreponen gracias á la escasa inclinación de los espejos, toda la región común está surcada por bandas verticales, alternativamente brillantes y oscuras, que se destacan claramente sobre el fondo del lienzo, uniformemente iluminado de rojo (fig. 494). Este hermoso fenómeno constituye las *franjas de Fresnel*. Están distribuidas *simétricamente*, en el campo iluminado, con relación á una de ellas cc, más brillante que las demás y que se denomina la *franja central*.

Cuando se opera con luz blanca, las franjas obtenidas son aún más bellas.

1. Este movimiento vibratorio es definido por las dos ecuaciones siguientes :

Ecuación de los espacios (ó de la *elongación*) $x = a \cos 2\pi \frac{t}{T}$,

Ecuación de las velocidades $V = b \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T}$,

siendo T la duración de una oscilación completa, a la elongación máximum, y b la velocidad máximum.

Entonces consisten en bandas *irisadas*, quiere decir, formadas por los colores del espectro, más ó menos sobrepuestos : el violado es el que más cerca se encuentra de la franja central, que sigue siendo brillante y absolutamente blanca.

Fig. 493.

481. **Explicación de las franjas de Fresnel. — Confirmación de la hipótesis de las ondulaciones.** — 1°. *Caso de la luz monocromática.* — A cada uno de los focos luminosos *s* y *s'* (fig. 493) corresponde un sistema de ondas análogas á las de la figura 313, En todos los puntos donde se crucen esos dos sistemas de ondas con una diferencia de marcha constante, se producirán interferencias. Los puntos *a*, *a'* (fig. 493), que están á igual distancia de los dos centros, reciben movimientos del mismo sentido y que se suman : es el lugar de la *franja central.* Este lugar está constituído en el espacio por un plano vertical cuya traza es AO en el plano de la figura 493. Si se corta este plano por una pantalla vertical y perpendicular á la recta AO, se tendrá á toda distancia del punto O una línea vertical brillante, que constituirá la franja central de la figura 494.

Á derecha é izquierda de este plano central su cruzan las ondas con diferencias de marcha crecientes. Para todos los puntos (tales como *b*, *b'*... *c*, *c'* donde la diferencia de marcha sea en *número par* de semi-longitudes de onda, habrá adición de movimiento y por consiguiente máximum de luz, como en el plano central : estos puntos constituirán las *franjas laterales brillantes;* para todos los puntos (tales como *m*, *m'*..., *n*, *n'*) en que la diferencia de marcha sea un *número*

impar de semi-longitudes de onda, habrá destrucción de movimiento y por tanto mínimum de luz : estos puntos constituirán las *franjas laterales oscuras.*

Todas estas franjas laterales son en el espacio hiperboloides de revolución

Fig. 494.

cuyas intersecciones por el plano de la pantalla son porciones de hipérboles, que en escasa extensión parecen rectilíneas (fig. 494).

2°. *Caso de la luz blanca.* — Hemos escogido la luz roja por ser la luz simple que da franjas más anchas. En efecto, repitiendo la experiencia con otras luces simples del espectro, se obtienen franjas cada vez más estrechas, á medida que

Fig. 495.

los colores empleados van siendo más refrangibles. La figura 495 representa las anchuras relativas de las franjas obtenidas sucesivamente con el rojo, el verde y el violado del espectro (para una misma diferencia de marcha, el ancho es igual á un mismo número de semi-longitudes de onda).

Al mismo tiempo que estas franjas son más ó menos anchas, están más ó menos distantes de la central : por ejemplo, la primera franja roja es la más lejana del centro, mientras que la primera violada es la más cercana. Llamando x á la distancia de una franja lateral de orden n á la franja central, y á la de la pantalla al punto O, c á la de los focos virtuales s y s' entre sí, é λ á la longitud de onda del color considerado, se tiene $x = \frac{ny}{4c}\lambda$. En consecuencia, cuando se emplea la luz blanca, las franjas del *mismo orden* (quiere decir, correspondientes á la misma diferencia de marcha) para los diversos colores se sobreponen, cubriéndose imperfectamente : su conjunto debe formar, pues, una especie de espectro confuso, que se reduce á una banda más ó menos irisada en los bordes y en la cual están colocados los colores en orden inverso de los del espectro solar relativamente á la franja central blanca.

482. **Necesidad de la existencia del éter.** — La conclusión necesaria de la experiencia de Fresnel es que la luz *vibra*, ó que es resultado de un *movimiento vi-*

bratorio, toda vez que interfiere. ¿ Pero cuál es la sustancia que vibra en un rayo luminoso? *No puede ser el aire*, como en un *rayo sonoro*, pues la luz no necesita de este fluido, ni para producirse, ni para propagarse. *Hay, pues, que admitir la existencia* de un nuevo medio elástico distinto del aire, que se encuentra dondequiera que la luz se propaga, no sólo en los espacios celestes sino también en el vacío aparente de nuestras máquinas neumáticas, así como en el aire luminoso y en los cuerpos transparentes que transmiten la luz, y aun en los opacos que no reflejan la luz sino modificándola más ó menos. Este fluido universal, que penetra y empapa cuanto existe en el universo, es el *éter*. Y así como el sonido es el resultado de cierto movimiento vibratorio del aire, así la *luz* es el resultado de cierto movimiento vibratorio del éter.

483. **Origen de los colores del espectro.** — La luz es pues al éter lo que el sonido es al aire; la luz viene á ser en cierto modo el *sonido* del éter [1]. Puede llevarse más lejos la asimilación, añadiendo que los diversos colores del espectro son las *notas* de la luz. Quiere decir esto que se deben á vibraciones más ó menos rápidas del éter, y por consiguiente á longitudes de onda más ó menos grandes. La fórmula $x = \frac{ny}{4c}\lambda$ ha permitido calcular λ para los diferentes colores del espectro. De esta manera se ha visto que las longitudes de onda del *violado* y del *rojo* son entre sí como 2 es á 3. Por consiguiente, llamando N_v y N_r á los números de vibraciones correspondientes á estos dos colores, como por definición se tiene

$$\lambda_v = \frac{V}{N_v} \quad \text{y} \quad \lambda_r = \frac{V}{N_r}, \quad \text{de donde} \quad \frac{N}{N} = \frac{\lambda_r}{\lambda_v},$$

resulta que la razón de los números de vibraciones $\frac{N}{N_r}$ es igual á $\frac{3}{2}$. De modo que entre estos dos colores hay el mismo intervalo que entre las notas *sol* y *do* de la escala natural, es decir, *una quinta*.

Nótase que el color *sube* del rojo al violado, como el sonido sube del *do* al *sol*, pero que sólo sube una *quinta*. La gama completa de los colores no comprende, pues, una octava entera, como la natural, sino únicamente una quinta.

484. **Valores numéricos de las longitudes de onda y de las vibraciones luminosas.** — La unidad con que se calculan las longitudes de ondas luminosas es habitualmente el *millonésimo de metro*, ó *micrón*. El número de vibraciones de cada color se deduce de su longitud de onda por la relación $N = \frac{V}{\lambda}$, siendo V la velocidad de la luz (77000 leguas por segundo ó 308 millones de metros). He aquí los números que se obtienen para los principales colores del espectro.

COLORES	LONGITUDES DE ONDA (en *micrones*)	NÚMERO DE VIBRACIONES (por segundo en cuatrillones)
Violado.	0,342	709
Índigo	0,449	668
Índigo-azul	0,459	654
Azul.	0,475	631
Verde	0,512	586
Amarillo	0,551	544
Rojo.	0,620	484

Se ve que el valor medio de una longitud de onda luminosa no pasa de *la mitad de un millonésimo de metro*, y que el número medio de las vibraciones pasa de 600 *mil miles de millón por segundo*.

1. A. Bertin, conferencia sobre la *polarizacion de la luz* (*Revue scientifique*, Enero de 1867).

485. **Otros fenómenos de interferencia : Anillos de Newton.** — 1°. *Producción del fenómeno.* — Todos los cuerpos diáfanos, sólidos, líquidos ó gaseosos, parecen coloreados con tonos extremadamente vivos, sobre todo por reflexión, cuando se les reduce á placas suficientemente delgadas. Tales son los cristales que se abren en hojas muy finas, como la mica, la piedra yesera, el nácar ; lo mismo ocurre con el vidrio soplado en bola muy tenue. Una gota de aceite extendida rápidamente sobre gran masa de agua, presenta todos los tonos del espectro en un orden constante. Una burbuja de jabón empieza por parecer blanca; pero á medida que se le va soplando, aparecen brillantes tonos irisados, sobre todo en la parte superior, donde es más delgada la envoltura que constituye la burbuja. Estos colores se disponen en zonas concéntricas horizontales alrededor del vértice : he ahí lo que se denomina *anillos coloreados.* El vértice se pone negro en el momento en que no hay grueso suficiente para reflejar la luz, y entonces la burbuja revienta de un golpe.

2°. *Experiencias de Newton.* — Newton fué el primero que estudió el fenómeno de los anillos coloreados. Queriendo ver la relación que existe entre el grueso de la lámina delgada, el color de sus anillos y su extensión, produjo éstos por medio de una capa de aire interpuesta entre dos vidrios, uno plano y el otro convexo y de foco muy largo (fig. 496). Exponiendo las dos superficies en una ventana, á la luz del día y de modo que se las vea por reflexión, se distingue en el punto de contacto una mancha negra rodeada de anillos coloreados, en número de seis ó siete, cuyos tonos se debilitan gradualmente (fig. 497). Si los vidrios se ven por transmisión, el centro de los anillos es blanco y sus colores son complementarios de los que tienen los anillos por reflexión.

Fig. 496.

Fig. 497.

Con una luz homogénea, por ejemplo la roja, los anillos son sucesivamente negros y rojos; tienen diámetro tanto más pequeño cuanto más refrangible es el color. Con la luz blanca aparecen los anillos teñidos por los diversos colores del espectro, lo cual depende de que como los anillos de los diferentes colores simples tienen diámetros diferentes, no se sobreponen, sino que se separan más ó menos.

Si la distancia focal de la lente es de 3 á 4 metros, los anillos pueden observarse á simple vista ; pero si el foco está más cerca, hay que mirarlos con un vidrio de aumento.

3°. *Teoría.* — La coloración de las láminas delgadas y de los anillos de Newton es un fenómeno de interferencia luminosa, que corresponde al de los tubos sonoros en acústica. En efecto, resulta de que los rayos que se han reflejado en la segunda superficie de la placa interfieren con los que la primera ha reflejado. Cuanto á los anillos vistos por refracción, provienen de la interferencia de los rayos transmitidos directamente con los que no son transmitidos sino después de dos reflexiones interiores en las caras de la placa.

4°. *Aplicación á la fotografía de los colores.* — M. G. Lippmann ha efectuado en los últimos tiempos una notable aplicación de este fenómeno á la fotografía de los colores. Más adelante (525) explicaremos su procedimiento.

486. **Otros fenómenos de interferencia : Difracción y redes.** — Así como se puede producir oscuridad añadiendo luz á luz, así es posible *aumentar el brillo* de algunos puntos del espacio *quitándoles* luz ; basta al efecto con que los rayos sustraídos sean precisamente los que podrían interferir con los que se conservan. Esto sucede en los fenómenos de *difracción* y de las *redes*, que vamos á describir sumariamente.

Difracción. — La *difracción* es una modificación que experimenta la luz cuando pasa rozando los contornos de un cuerpo, ó si pasa por una pequeña abertura, modificación en virtud de la cual parecen doblarse y penetrar en la sombra los rayos luminosos.

Redes. — Llámase *red* en óptica á una serie de rayas, alternativamente opacas y transparentes, muy cercanas unas á otras. Tales son los trazos paralelos que

se graban con el diamante en vidrio para formar los micrómetros. En este caso los trazos son la parte opaca de la red.

Si se hace pasar la luz á través de una red de este género, que contenga por ejemplo 100 trazos por milímetro, he aquí el curioso fenómeno que se observa. Faltando la red, la luz no saldría del campo de la abertura por donde penetra en la cámara oscura; pero con la red se ven máximas de diversos colores, que forman una serie de espectros en una línea perpendicular á los trazos de la red.

Este es un fenómeno análogo al que se observa sin necesidad de aparato cuando se mira un mechero de gas á través de los intersticios que dejan entre sí los dedos de la mano, ó bien á través de las pestañas.

Con *redes cruzadas*, los espectros se extienden, no sólo en una línea, sino en todas direcciones. Este género de interferencias suministra uno de los fenómenos más hermosos de la óptica física.

Por fin, si las mallas de la red forman *círculos concéntricos*, los espectros se extienden en forma de anillos. Este es un fenómeno análogo al de las coronas que se observan alrededor de la luna en noches de bruma ó en torno de los mecheros de gas cuando hace niebla.

POLARIZACIÓN.

487. **Definición experimental de la polarización.** — I. *Experiencia de Bartholín.* — Cuando se hace incidir un haz luminoso sobre un romboedro de espato, salen dos: uno, que hemos llamado haz ordinario, y otro, el extraordinario, que tiene la propiedad de girar en torno del primero cuando se hace dar vueltas al romboedro alrededor del haz incidente. Si se reciben estos haces en una misma pantalla, cada uno de ellos pinta allí una imagen de la abertura: al haz ordinario corresponde una *imagen ordinaria*, y al otro una *imagen extraordinaria*. Estas imágenes tienen el carácter constante de ser siempre, y en todas sus posiciones, *iguales* en intensidad. Y si se dispone el experimento de manera que estas dos imágenes se sobrepongan parcialmente, obsérvase que el brillo de la región común es doble del de las partes distintas (fig. 498).

Fig. 498.

II. *Experiencia de Huygens.* — *Romboedros cruzados y Nicoles cruzados.* — Huygens complicó en 1678 de una manera muy feliz la experiencia de Bartholin[1]. Habiendo desdoblado un haz luminoso incidente haciéndole atravesar un primer romboedro de espato, recibió los dos haces emergentes sobre un segundo espato idéntico al primero y orientado respecto de éste de modo cualquiera; así obtuvo un nuevo desdoblamiento de cada haz, lo que hacía en todo *cuatro* haces y *cuatro* imágenes. Hasta ahí no había nada de nuevo: era natural que el segundo espato actuara sobre la luz lo mismo que el primero, refractándola doblemente. Pero habiendo dejado inmóvil uno de los espatos, mientras hacía girar al otro en torno del haz incidente, produjo fenómenos completamente nuevos.

Puede ejecutarse el experimento de Huygens simplificando la disposición expresada. Con tal fin, en vez de utilizar romboedros naturales de espato, se toman dos cristales de esta sustancia, tallados artificialmente y modificados de modo que dejen de ser *birrefringentes*. Esto es lo que se denomina *prismas de Nicol*, ó sencillamente *nicoles* en recuerdo de su inventor[2]. En realidad el cristal

1. A. Bertin, *loc. cit.*
2. Para hacer un *nicol*, se toma un romboedro de espato de Islandia de 20 á 30 milíme-

no pierde su propiedad birrefringente; pero el rayo refractado extraordinariamente emerge solo, mientras que el ordinario sufre una reflexión interior. Por lo demás, las caras que la luz atraviesa son dos caras naturales del espato (fig. 501); son, pues dos rombos donde es fácil distinguir las dos pequeñas diagonales que definen la sección principal del cristal.

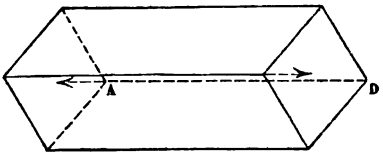


Fig. 501.

Si se pone un primer nicol en el trayecto de la luz, no se obtiene más que un solo rayo refractado, y si se hace dar vuelta al nicol alrededor del rayo incidente, la luz pasa siempre con facilidad, no perdiendo ni su intensidad ni su color: todo ocurre como si hubiera atravesado una sencilla lámina de vidrio. Pero recibamos este rayo emergente en un segundo nicol, análogo al primero. Si lo hacemos girar primero de modo que las secciones princi-

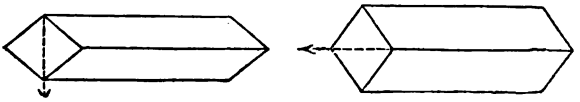


Fig. 502.

pales sean paralelas, no vemos nada de particular, la luz atraviesa el segundo cristal lo mismo que el primero; pero si cruzamos las secciones principales (fig. 502) ya no hay rayo emergente, la luz *se apaga*: el segundo nicol, que hace un instante era *transparente* como el vidrio, parece haberse vuelto opaco como plomo.

III. *Interpretación de estas experiencias.* — Interpretemos la experiencia de Huygens. La luz natural, es decir, la que nos llega directamente del sol, atraviesa todos los nicoles, sea cual fuere la orientación; pero la luz que ha atravesado un primer nicol no puede pasar á través de un segundo *cuando sus secciones principales están cruzadas;* esta luz no es pues ya la luz *natural;* su paso á través del primer nicol le ha comunicado nuevas propiedades, entre otras la de no poder atravesar el segundo nicol. Exprésase este hecho diciendo que *esta luz está polarizada*, y este nuevo fenómeno constituye la *polarización de la luz.* De manera que se puede definirla de la manera siguiente: *Un rayo polarizado es un rayo que ha atravesado un primer nicol: un segundo nicol orientado de manera que forme ángulo recto con el primero, lo apaga por completo.*

tros de altura próximamente, por 8 á 9 de ancho, y se le divide en dos, siguiendo un plano perpendicular al de las grandes diagonales de las bases y que pasa por los vértices obtusos más cercanos entre sí, y después se vuelven á pegar los dos pedazos, orientados del mismo

Fig. 499.

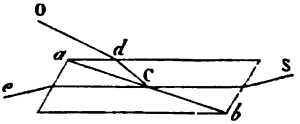


Fig. 500.

modo, con bálsamo del Canadá. El paralelipípedo construído de esta manera constituye el prisma de Nicol (fig. 499).

Como el índice de refracción del bálsamo del Canadá es más pequeño que el ordinario del espato de Islandia, pero mayor que su índice extraordinario, resulta de ahí que cuando un haz luminoso SC (fig. 500) penetra en el prisma, el rayo ordinario experimenta en la superficie *ab* la reflexión total, y toma la dirección C*d*O, mientras que el rayo extraordinario Ce pasa sólo.

488. **Causa de la polarización : Vibraciones transversales del éter.** — Si la rotación del primer nicol alrededor del rayo incidente no produce ningún efecto sea cual fuere la orientación de la sección principal del cristal, es evidentemente porque el rayo incidente ó rayo natural es idéntico á sí mismo en toda su periferia. Pero no ocurre lo mismo con el rayo polarizado, puesto que, pudiendo pasar por un segundo nicol orientado *paralelamente* al primero, es apagado si la orientación es *perpendicular*. Luego, no todo es igual en el contorno de este rayo polarizado : el lado horizontal es enteramente distinto del vertical [1].

De ahí precisa deducir que la vibración luminosa no puede ser longitudinal, esto es, dirigida según el rayo mismo, pues entonces este rayo sería idéntico á sí mismo en todo su contorno. Esta vibración no puede tampoco ser *oblicua* al rayo luminoso, pues si lo fuese, podría descomponerse necesariamente en dos vibraciones componentes (según la regla del *paralelógramo de las velocidades*) ; una, *transversal*, seguiría siendo perpendicular al rayo, y la otra *longitudinal*. Ahora bien, esta última no podría ser apagada nunca por un nicol, puesto que sería idéntica á sí misma en todo su contorno. Por consiguiente, no pudiendo la vibración luminosa ser ni paralela al rayo ni oblicua, debe serle *perpendicular* : luego las *vibraciones luminosas* son *vibraciones transversales*, lo mismo que las vibraciones de las ondas acuosas que hemos estudiado precedentemente en acústica (324).

Hay, pues, que admitir por fuerza, como una consecuencia rigurosa de la experiencia, que la *luz es el resultado de las vibraciones transversales del éter*. En la luz natural, las vibraciones transversales se efectúan en todas direcciones á la vez en torno del rayo ; en la luz que ha atravesado un nicol ó un cristal birrefringente, las vibraciones transversales han sido orientadas en una sola y misma dirección : por esto se dice que el rayo está *polarizado*.

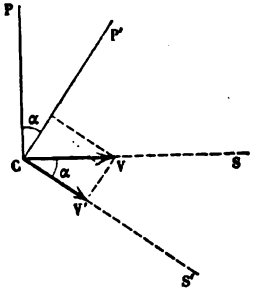


Fig. 503.

Supongamos que un rayo polarizado atraviese el plano del lienzo en el punto C, y sea CP la traza de su plano de incidencia (fig. 503). Estando polarizado el rayo, su vibración se encuentra necesariamente situada en el plano del lienzo. Por lo demás, podría estar orientada en un azimut cualquiera, alrededor del punto C : pero admitiremos con Fresnel que está orientada según CVS, quiere decir, en un plano perpendicular al de incidencia. Exprésase este hecho diciendo que el rayo luminoso *está polarizado en el plano* CP.

489. **Ley de Malus.** — El plano CS es el de la sección principal del primer nicol : luego la vibración del rayo extraordinario se encuentra á su vez en este plano : representémosla por la longitud CV, que tomamos igual al valor máximum de la velocidad.

Supongamos que en C incida el rayo luminoso sobre un segundo nicol, cuya sección principal CS' esté orientada de modo cualquiera y forme un ángulo α con la sección principal CS del primer nicol. El rayo que salga del segundo nicol vibrará análogamente en el plano CS' y tendrá al plano CP' como nuevo plano de polarización.

El físico Malus demostró que *la velocidad máximum* CV' *de la nueva vibración se deduce de la velocidad máximum inicial* CV *por la regla del paralelógramo de las velocidades.*

Siendo CV' la componente de CV, se tiene entre estas dos cantidades la expresión

[1] $$CV' = CV \cos \alpha.$$

Como por otra parte se demuestra que *la intensidad* I *de un rayo luminoso es proporcional al cuadrado de su velocidad maximum*, resulta que la intensidad I' del nuevo rayo polarizado está enlazada con la intensidad inicial I por la ecuación

[2] $$I' = I \cos^2 2\alpha.$$

1. A. Bertin, *loc. cit.*

Una cualquiera de esas dos ecuaciones [1] y [2] expresa lo que se llama *ley de Malus*.

490. **Consecuencias de la ley de Malus. — Demostración experimental.** — La primera consecuencia de la ley de Malus es el fenómeno que nos ha servido para definir la polarización. Se ve que si $\alpha = 90°$, esto es, que si la sección principal del segundo nicol es perpendicular á la sección principal del primero, se tiene $I' = 0$, quiere decir, que la intensidad del rayo luminoso se reduce á *cero* : el segundo nicol *lo apaga*. Esta consecuencia se ha demostrado antes por el experimento de los nicoles cruzados.

Por el contrario, si $\alpha = 0$, $I' = I$, es decir, que la intensidad del rayo polarizado no disminuye por su paso á través del segundo nicol. Esto es lo que habíamos visto precedentemente, orientando la sección principal del segundo nicol paralelamente á la del primero.

Por fin, si α tiene un valor cualquiera, comprendido entre 0 y 90°, el cociente $\left(\frac{I'}{I}\right)$ tiene un valor comprendido entre 0 y 1, quiere decir que la intensidad I' del rayo transmitido por el segundo nicol es siempre menor que la del rayo polarizado por el primero; y cuando la inclinación del segundo nicol sobre el primero varía desde 0° hasta 90°, la debilitación de la imagen transmitida se acentúa cada vez más, hasta llegar á la extinción completa.

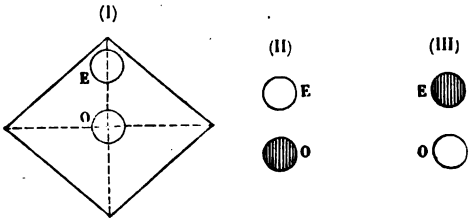


Fig. 504.

Experiencias. — Es fácil poner de manifiesto esta variación continua de intensidad, *analizando* según se dice, esto es, haciendo pasar por un nicol los dos haces luminosos que son transmitidos por un romboedro de espato en la experiencia de Bartholin. Hagamos primero girar al romboedro en torno del haz incidente de modo que se distingan las dos imágenes : se ve la imagen ordinaria que permanece inmóvil, y la imagen extraordinaria que va á colocarse encima de la primera en el mismo plano vertical (fig. 504 I), la pequeña diagonal del romboedro es entonces vertical y lo mismo ocurre con la sección principal del cristal. Analicemos ahora estas dos imágenes con un nicol. Para apagar la *imagen ordinaria*, debemos hacer que la diagonal mayor del nicol se ponga horizontal, como la del espato (fig. 504 II); para apagar la *imagen extraordinaria*, hay que dar vuelta al nicol de manera que su diagonal mayor se ponga vertical como la diagonal pequeña del espato (fig. 504, III). Por fin, en las posiciones intermedias del nicol, las dos imágenes son visibles pero con grados de intensidad diferentes.

Fig. 505.

La figura 505 representa, en un círculo doble, las dos imágenes en sus diversos grados de debilitación.

491. **Diversos procedimientos de polarización de la luz.** — Esta modificación de la luz puede realizarse de diferentes maneras.

I. *Polarización por doble refracción.* — El método más antiguo es la *doble refrac-*

ción. Hemos visto en la experiencia precedente que los dos haces que salen de un espato pueden ser alternativamente *apagados* por un nicol. Ambos son polarizados y en ángulo recto : el *haz ordinario* en el plano de la sección principal del nicol (ó en el plano de la sección principal del espato), y el *haz extraordinario* en un plano perpendicular á la sección principal.

II. *Polarización por reflexión.* — 1°. *Experiencia de Malus.* — Observando un día el físico francés Malus[1] desde su casa la luz que se reflejaba en las ventanas del palacio del Luxemburgo, notó que se la podía apagar con un espato, y que en consecuencia estaba polarizada.

He aquí cómo se puede repetir este experimento. Dirígese un haz de luz natural sobre un espejo vertical, de modo que se la refleje horizontalmente, con incidencia apropiada. Si se recibe sobre un nicol el haz reflejado, es posible apagarlo enteramente, dada orientación oportuna del nicol : *luego el rayo reflejado está polarizado.* En el momento de la extinción se observa que la diagonal mayor del nicol es *vertical* : luego la vibración del rayo reflejado es también vertical, quiere decir, perpendicular al plano de reflexión, que es horizontal. Luego el rayo reflejado está polarizado en el plano de reflexión (ó de incidencia).

2°. *Ángulo de polarización.* — La reflexión como la doble refracción opera, según esto una especie de elección de las vibraciones luminosas. Esta elección es tanto más perfecta y tanto más completa la polarización que de ahí resulta cuanto más apropiado es el ángulo de reflexión.

El ángulo para el cual es máximum la polarización se llama *ángulo de polarización.* Es de 34°25' en la superficie del vidrio.

3°. *Ley de Brewster.* — Todos los cuerpos pueden, lo mismo que el vidrio, polarizar la luz por reflexión; pero más ó menos completamente y bajo ángulos de polarización muy diversos.

Por ejemplo, el *mármol negro* polariza completamente la luz, mientras que el *diamante*, el *vidrio ordinario*, el *vidrio de antimonio* sólo la polarizan parcialmente. Los metales son entre todos los cuerpos los que tienen menor poder polarizante.

Cuanto á los ángulos de polarización, varían con las diversas sustancias, según la ley siguiente, debida á Brewster:

El ángulo de polarización es el ángulo de incidencia para el cual el rayo reflejado es perpendicular al refractado.

Fig. 506.

Así, cuando un rayo luminoso SI (fig. 506) incide sobre un espejo de vidrio bajo el *ángulo de polarización* (35°25'), se divide en dos rayos, uno IR que es reflejado en el aire bajo un ángulo de reflexión igual al de incidencia y el otro Ir, que es refractado en el vidrio, perpendicularmente al rayo IR.

III. *Polarización por refracción simple.* — En la refracción simple se polariza igualmente el rayo refractado, pero en un plano perpendicular al de incidencia. Luego los dos rayos, reflejado y refractado, que corresponden al rayo incidente único, son polarizados en planos rectangulares.

IV. *Conclusión.* — Así todas las modificaciones (ó casi todas) que experimenta la luz natural (reflexión, refracción simple y doble refracción) la polarizan más ó

1. Malus era profesor en la Escuela Politécnica de París.

menos completamente. Y como en la superficie de la tierra se recibe muy poca luz que no haya sufrido en grado mayor ó menor una de estas modificaciones, resulta de ahí que es difícil no obtener *luz polarizada*, sino obtenerla *que no esté polarizada parcialmente.*

Luz natural. — Resulta además de estos diversos métodos de polarización que un haz de luz natural puede considerarse como formado por dos *haces de igual intensidad, polarizados en ángulo recto.*

492. **Interferencia de los rayos polarizados.** — Después del descubrimiento de la polarización, Arago y Fresnel trataron de averiguar si los rayos polarizados presentaban entre sí los mismos fenómenos de interferencia que los no polarizados. Sus experiencias los condujeron á las dos leyes siguientes :

1ª LEY. — *Dos rayos polarizados en el mismo plano interfieren entre sí lo mismo que dos rayos naturales.*

2ª LEY. — *Dos rayos polarizados en dos planos perpendiculares no interfieren en el caso en que interferirían dos rayos naturales*[1].

493. **Aparatos de polarización.** — Todas las experiencias de polarización se efectúan fácilmente por medio de instrumentos especiales, llamados *aparatos de polarización.* Aunque son muy varios de forma, se reducen todos á dos órganos esenciales :

Fig. 507.

1°. El *polarizador*, pieza que recibe la luz incidente natural y que la polariza por uno de los medios antes estudiados;

2°. El *polariscopio* ó *analizador*, pieza que recibe la luz polarizada y que sirve para *analizarla*, esto es, para reconocer si está polarizada y determinar el plano de polarización.

La pieza que sirve de *analizador* puede ser por lo demás la misma que se usa como *polarizador*, ya un *espejo oscuro* ó un nicol, si sólo se trata de obtener una imagen; ya un romboedro de espato si el propósito es obtener dos.

Entre el polarizador y el analizador se colocan las sustancias que se desea observar en la luz polarizada. Esta observación puede efectuarse de dos maneras : ya se hacen los rayos paralelos, ya se les obliga á converger por medio de una lente. En el primer caso se dice que se observa en la *luz polarizada paralela*, y en el segundo se observa en la *luz polarizada convergente.*

Los aparatos de polarización más conocidos son :

1°. El aparato primitivo de Malus, perfeccionado por Biot, que algunos llaman *polariscopio de Biot.*

2°. El *aparato de Norremberg.*

3°. Los *diversos sacarímetros*, cuyo tipo es el *sacarímetro de Biot.*

494. **Aparato de Norremberg.** — Norremberg transformó el aparato primitivo é incómodo de Biot en un instrumento sencillo y poco dispendioso.

Descripción. — Compónese de dos columnas de cobre *b* y *d* (fig. 507), que sostienen un espejo no estañado *n*, móvil alrededor de un eje horizontal. Un pe-

1. De estas leyes se deduce la explicación de los brillantes fenómenos de coloración en las láminas delgadas que constituyen la *polarización cromática* propiamente dicha.

queño círculo graduado *c* indica el ángulo que este espejo forma con la vertical. Entre los pies de las dos columnas hay un espejo estañado *p*, fijo y horizontal. Estas mismas columnas llevan un círculo graduado, donde puede girar un disco *o*, en cuyo centro hay una abertura cuadrangular y que sostiene un espejo de vidrio negro *m*, que forma con la vertical un ángulo idéntico al de polarización. Por fin, un disco anular graduado *k* puede fijarse, mediante un tornillo de presión, á diferentes alturas de las columnas. Otro anillo *a*, sostenido por el primero, puede tomar alrededor de un eje horizontal diferentes inclinaciones, y sostiene un diafragma *e*, taladrado en su centro por una abertura circular.

Fancionamiento. — Si el espejo *n* forma con la vertical un ángulo de 35°25', quiere decir, igual al ángulo de polarización del vidrio, los rayos S*n* que encuentran á dicho espejo bajo este ángulo se polarizan, reflejándose en la dirección *np*, hacia el espejo *p*, que los devuelve en la dirección *pnr*. Después de atravesar el espejo *n* el haz polarizado incide sobre el espejo oscuro con ángulo de 35°25', puesto que este espejo forma precisamente el mismo ángulo con la vertical. Ahora bien, si se hace dar vueltas horizontalmente al disco *o* á que está fijo el espejo *m*, éste se mueve conservando siempre la misma inclinación, y se observan dos posiciones en que no refleja al haz incidente *nr* : es cuando el plano de incidencia en este espejo resulta perpendicular al plano de incidencia S*np* en el espejo *n*. Tal es la posición representada en el dibujo. En cualquiera otra, el haz polarizado es reflejado siempre por el espejo *m* en cantidad variable, y el máximum de luz reflejada se obtiene cuando los planos de incidencia en los espejos *m* y *n* son paralelos entre sí. Si el espejo *m* forma con la vertical un ángulo mayor ó menor de 35°25', el haz polarizado se refleja siempre en todas las posiciones del plano de incidencia.

POLARIZACIÓN ROTATORIA.

495. **Rotación del plano de polarización.** — *Definición del fenómeno.* — Cuando un rayo polarizado atraviesa una placa de cuarzo tallada perpendicularmente al eje de cristalización, este rayo es polarizado también á la emergencia, pero no ya en el mismo plano de polarización que antes de su paso por el cuarzo. Con ciertos ejemplares, el nuevo plano está dirigido hacia la izquierda del antiguo; con otros cae á la derecha. Este es el fenómeno que se llama *polarización rotatoria.* Biot ha descubierto sus leyes.

LEYES. — 1°. *La rotación del plano de polarización no es idéntica para los diversos colores simples ; sino tanto mayor cuanto más refrangibles son éstos.*

2°. *Dado un mismo color simple y placas del mismo cristal, la rotación es proporcional al grueso.*

3°. *En la rotación de derecha á izquierda ó de izquierda á derecha, el mismo grueso imprime movimiento sensiblemente idéntico.*

496. **Coloración producida por la polarización rotatoria.** — Cuando se mira con un prisma *birrefringente*[1] una lámina de cuarzo de algunos milímetros de grueso, cortada perpendicularmente al eje, y atravesada por un haz de luz polarizada, se observan dos imágenes de viva coloración : sus tonos son complementarios, pues cubriéndose una á otra por sus bordes, dan blanco (fig. 509). Y si entonces se da vuelta al prisma, las dos imágenes cambian de color y toman sucesivamente todos los del espectro, aunque continúan á ser complementarios.

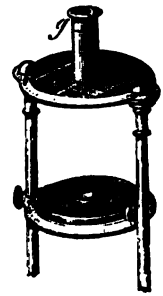


Fig. 508.

Estos fenómenos de coloración se observan muy bien con el aparato de Norremberg (fig. 508). Para esto se coloca en la pantalla *e* una placa de cuarzo *s*, tallada perpendicularmente al eje y fija en un disco de corcho; después, estando inclinado el espejo *n* de modo que se haga pasar por el cuarzo un haz polarizado, se mira á través de un prisma birrefringente *g*, y haciendo dar vuelta al tubo en que está ese prisma, se observan las imágenes complementarias de que hemos hablado antes (fig. 508).

1. El *prisma birrefringente* (fig. 508) es un polariscopio ó analizador muy usado.

Este fenómeno es una consecuencia de la primera ley. En efecto, Biot reconoció que el cuarzo hace girar al plano de polarización del rayo rojo cerca de 17°30', al del rayo violado 44°,5, y á los de los demás rayos ángulos intermedios; en consecuencia, cuando la luz polarizada que ha atravesado la placa de cuarzo emerge, los diversos colores simples que contiene son polarizados en diferentes planos. Por consiguiente, si el haz así transmitido por el cuarzo es recibido á través de un prisma birrefringente que lo descompone en otros dos polarizados en ángulo recto, los diversos colores simples se reparten desigualmente entre las dos imágenes, ordinaria y extraordinaria, suministradas por el prisma: de donde resulta que estas imágenes son necesariamente complementarias, hallándose en una los colores que faltan en la otra.

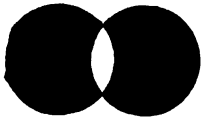


Fig. 509.

497. **Poder rotatorio de los líquidos. — Experiencias de Biot.** — Hasta 1815 no se conocía más que el poder rotatorio del cuarzo. En esta época observó Biot la misma propiedad en gran número de líquidos, tales como el agua azucarada, la solución de ácido tártrico, la esencia de trementina, etc. Operaba con luz simple, pues con la blanca habría obtenido fenómenos de coloración menos fáciles de apreciar que la extinción. Primero notó que, considerando los líquidos ó las disoluciones que tienen el poder rotatorio, unos hacen girar á la derecha el plano de polarización, como el *cuarzo recto*, y los otros á la izquierda, como el *cuarzo alabeado*. A las primeras les dió el nombre de sustancias *dextrogiras*: tales son el *azúcar de caña* (disuelto en el agua), la *esencia de limón*, la *tintura de alcanfor* (disolución alcohólica de alcanfor), la *dextrina*, el *ácido tártrico*; á las otras las denominó *levogiras*: tales son el *aguarrás* ó *esencia de trementina*, la *esencia de laurel* y la *goma arábiga*.

Además, descubrió que la rotación producida por los líquidos es mucho menor que la del cuarzo, dada igualdad de grueso. Así, el jarabe de azúcar de caña concentrado, que es una de las sustancias más activas, hace girar *treinta y seis veces menos* que el cuarzo.

Por fin, observó que la rotación del plano de polarización puede dar á conocer en una disolución las alteraciones ó cambios de constitución que el análisis químico sería incapaz de revelar. Por ejemplo, el *azúcar de uva* hace girar hacia la izquierda el plano de polarización, mientras que el *azúcar de caña* en igualdad de circunstancias lo hace girar hacia la derecha, y sin embargo, ambas sustancias son idénticas en lo relativo á constitución química.

Ley de Biot. — Poder rotatorio molecular. — La rotación impresa al plano de polarización por una misma sustancia ó disolución depende — en igualdad de circunstancias — del grado de concentración de esta disolución, así como del grueso de la capa líquida atravesada por la luz. Biot determinó la ley de estas variaciones.

La rotación del plano de polarización producida por una solución activa es proporcional al peso de la sustancia disuelta en la unidad de volumen del líquido neutro y á la longitud del tubo en que se observa.

Por ejemplo, la experiencia prueba que, operando con azúcar seco, precisa disolver 16,31 g en 0,1 litro de agua y observar la disolución en un tubo de 20 centímetros para obtener la misma rotación que con una placa de cuarzo de 1 milímetro de grueso.

Sea pues V el volumen de una solución que contenga un peso P de la sustancia activa; el peso disuelto en la unidad de volumen será $\frac{P}{V}$; si se observa esta disolución en un tubo de longitud L, la rotación α impresa al plano de polarización será, según la ley de Biot, proporcional á $\frac{P}{V}$ L. Designando por ρ un coeficiente que es constante para una misma sustancia disuelta, pero variable de un cuerpo á otro, se tendrá la expresión algébrica de la ley de Biot

$$\alpha = \rho \frac{PL}{V}.$$

El coeficiente ρ se llama *poder rotatorio molecular* de la sustancia activa.

Valor numérico de ρ. — El valor numérico del *poder rotatorio molecular* de una sustancia activa depende pues al mismo tiempo del color adoptado como tipo, así como de las unidades de longitud, de volumen y de peso adoptadas.

Siendo la sacarimetría la operación más usual de este género de trabajos, conviene adoptar sus unidades [1]. De modo que se referirán las rotaciones α á los *rayos amarillos*, tomando como unidad de peso el *gramo*, por unidad de volumen el *decilitro* y por unidad de longitud el *decímetro*.

Entonces se definirá el *poder rotatorio molecular* de la manera siguiente : es *la rotación impresa á las vibraciones de los rayos amarillos por una disolución que contaviera* 1 *gramo de sustancia activa por decilitro y que se observara en un tubo de* 0,1 *m. de longitud.*

Supongamos que la rotación observada sea 24°, en un tubo 0,2 m., para una solución de azúcar de caña que contenga 16,35 g. en decilitro ; se tendrá

$$24 = \rho \frac{16{,}35 \times 2}{1}, \quad \text{de donde} \quad \rho = 0^{\circ},734 \quad \text{ó} \quad 44'20''.$$

498. **Aplicación de la polarización rotatoria.** — La determinación del poder rotatorio molecular de las diferentes sustancias activas suministra un medio precioso de apreciar el grado de concentración ó de pureza de sus disoluciones. He aquí un ejemplo de esta aplicación.

Se ha visto que disolviendo 16,35 g de azúcar en 0,1 litro de agua, y observando la disolución en un tubo de 0,2 m, se hace girar 24° hacia la derecha el plano de polarización de los rayos amarillos : esta es la rotación que se obtendría con una placa de 1 mm de cuarzo recto. Supongamos que se haya comprado azúcar bruto y que se desee averiguar la cantidad de *azúcar puro* que contiene. Bastará pesar 16,35 g y hacerlos disolverse en 0,1 litro de agua pura, filtrar y clarificar la disolución, echarla en un tubo de 0,2 m de largo, y tratar de averiguar cuánto hace desviarse hacia la derecha las vibraciones amarillas. Ó más bien, en vez de operar directamente de esta manera, se tratará de averiguar qué grueso de *cuarzo alabeado* precisa sobreponer á la disolución para anular su rotación. Por ejemplo, si hallamos que se necesita una placa de 0,80 mm, concluiremos que el *azúcar bruto* ensayado contenía 80 por 100 de *azúcar cristalizable.* Ningún método de análisis químico es tan seguro y expedito como este método físico.

El ensayo es con mucho el uso más frecuente de la polarización rotatoria. Por tal motivo se ha dado el nombre de *sacarimetría* á dicho método de análisis y el de *sacarímetros* á los instrumentos que se fabrican para aplicarlo. Pero no sólo los emplea el industrial. También el fisiólogo puede estudiar de la misma manera las variaciones de la albúmina en la sangre y en los demás líquidos del organismo; el médico puede seguir en el sacarímetro el desarrollo de la enfermedad llamada *diabetes sacarina.*

499. **Sacarimetría y sacarímetros : Principio y Método, órganos esenciales.** — El sacarímetro es, pues, un instrumento que sirve para determinar no precisamente la rotación que una sustancia activa puede imprimir á las vibraciones amarillas, sino el grueso de la lámina de cuarzo que es capaz de producir una rotación igual. Esta determinación se efectúa por el método de *compensación*, quiere decir compensando la rotación de la sustancia, dextrogira ó levogira, que se estudia por medio de una placa de cuarzo que hace girar en sentido contrario.

Este método de compensación se funda en el hecho de que, cuando se sobreponen dos sustancias activas, de signo contrario, la *rotación total* impresa por el sistema, es igual á la *suma algébrica* de las rotaciones de cada sustancia. Por ejemplo, si se toman 2 láminas de cuarzo, una de las cuales hace girar las vibraciones rojas 18° hacia la derecha, y la otra las hace girar 18° hacia la izquierda, el sistema de los dos cuarzos superpuestos será *inerte* como una lámina de vidrio del mismo grueso; no producirá ningún efecto de rotación, ni en la luz roja, ni en la blanca.

El óptico Soleil ha construido conforme á este principio dos pequeños aparatos que son los órganos esenciales de todo *sacarímetro* : la *placa de dos rotaciones* y el *compensador.*

1. A. Bertin, *loc cit.*

1°. *Placa de dos rotaciones.* — *Tono sensible.* — El aparato se compone de dos placas de cuarzo, de rotación contraria y de análogo grueso, no superpuestas, sino *pegadas*, *yuxtapuestas*. Este sistema suministra el medio más delicado que se conoce de poner el analizador del sacarímetro *en el* O°, quiere decir, en la posición de la extinción.

Para esto se da á cada uno de los cuarzos, no un grueso cualquiera, sino uno rigurosamente igual á 7,5 mm. Como 1 mm de cuarzo hace girar la vibración amarilla exactamente 24°, una placa de 7,5 mm hará girar la misma vibración 24° × 7,5 ó 180°. Pero 180° y 0° es lo mismo en el movimiento de orientación de un analizador, puesto que estos dos azimuts están diametralmente opuestos en el círculo. Supongamos pues que se tenga un aparato de polarización cualquiera y que se haya colocado el analizador en él *para la extinción* en la luz blanca : si se interpone la placa de dos rotaciones, los rayos amarillos serán apagados por los dos cuarzos, y las dos mitades de la imagen quedarán teñidas ambas con el tono complementario del amarillo. Si por ejemplo, el analizador es un nicol, la imagen única que dé estará teñida uniformemente con este color complementario del amarillo (fig. 510, I). Pero por poco que se mueva el nicol, hacia un lado ú otro, las dos mitades de la imagen, correspondientes á las dos mitades de la placa, cambiarán en sentido inverso, é inmediatamente se notará que así es, por causa de la oposición de los colores producidos (fig. 510, II y III).

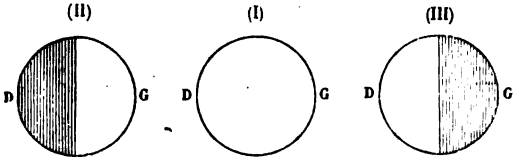


Fig. 510.

Este tono complementario del amarillo es un *violado claro* ó *violado rosado*, que se conoce por el nombre de *tono sensible*. Es claro porque corresponde á la extinción de los rayos amarillos, que son los más brillantes del espectro.

Es tanto más fácil de notar, y por consiguiente tanto más *sensible*, cuanto que está situada entre un *rojo* y un *azul*, que se obtiene dando vuelta ligeramente al analizador, sea *á la derecha*, sea *á la izquierda*.

2°. *Compensador.* — El compensador está constituido por dos cuarzos de rotaciones contrarias, no *yuxtapuestos*, sino *sobrepuestos*. Uno, G, es fijo, levogiro (fig. 511) y de una sola pieza; el otro está dividido diagonalmente en dos prismas muy agudos, D, D, que se deslizan uno sobre otro mediante una cremallera, (La figura 511 representa el dibujo esquemático del aparato y la figura 513, II lo repre-

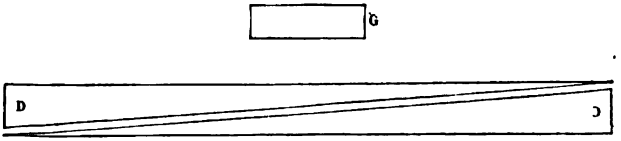


Fig. 511.

senta tal como sirve en el sacarímetro de Soleil). De este deslizamiento resulta que el segundo cuarzo, que es dextrogiro, presenta al rayo un grueso que puede variar desde cero á un grueso *superior* al del primer cuarzo. De esta manera se puede llegar á la compensación exacta por grados insensibles y apreciar variaciones de grueso muy pequeñas por medio de las divisiones de una regla que mide el movimiento de los dos prismas (fig. 513, III).

500. **Sacarímetro de Soleil.** — El óptico Soleil construyó el primer sacarímetro (fig. 512).

1°. *Descripción.* — En el aparato pueden distinguirse tres partes principales : un tubo que contiene el líquido que se trata de analizar, un polarizador y un analizador.

El tubo *m*, que contiene el líquido, es de cobre estañado interiormente; está

cerrado en sus dos extremos por dos espejos de caras paralelas y se encuentra sostenido por un montante *k*, que termina en sus dos extremidades por dos tubos *r* y *a*, donde están los cristales que sirven de polarizadores y de analizadores están representados en la sección (fig. 513).

Delante del orificio S se coloca una lámpara ordinaria de moderador. La luz emitida por esta lámpara en la dirección del eje del instrumento encuentra primero un prisma birrefringente *r*, que sirve de polarizador. A la vista no llega más

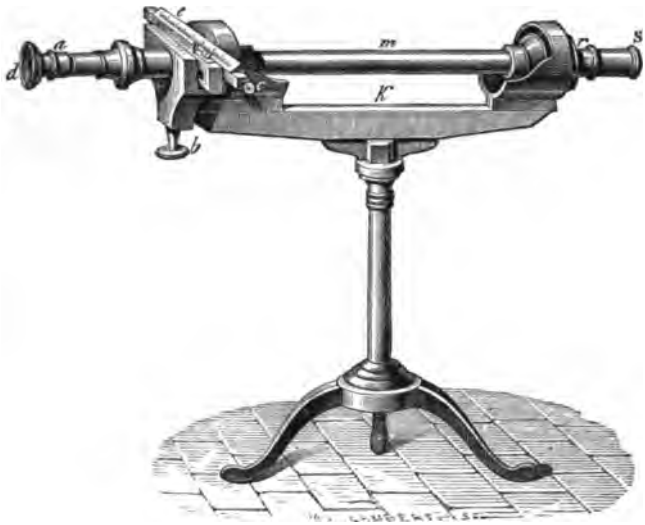


Fig. 512.

que la imagen ordinaria, pues la extraordinaria es arrojada del campo de la visión á causa de la amplitud del ángulo que forman entre sí el rayo ordinario y el extraordinario. Por fin, el prisma birrefringente se encuentra en posición tal que el plano de polarización queda vertical y pasa por el eje del aparato.

Al salir del prisma birrefringente el haz polarizado encuentra una placa de doble rotación, cuyo uso hemos explicado.

Después de haber atravesado el cuarzo *q*, el haz polarizado penetra en el líquido que contiene el tubo *m*, y desde allí va al encuentro de un compensador, formado por un cuarzo simple *i* y del doble cuarzo *n*. El movimiento de las dos mitades del compensador se obtiene por medio de una barra dentada doble y de un piñón á que se da vuelta por medio de un botón *b* (fig. 512 y 513, I).

Cuando las láminas se mueven respectivamente en el sentido indicado por las flechas (fig. 513, II), es evidente que la suma de sus gruesos aumenta; por el contrario, disminuye cuando las placas andan en sentido opuesto. Una escala *e* y un nonius *v* (fig. 513, III) siguen en su movimiento á las placas y sirven para medir las variaciones de grueso del compensador. Esta escala, representada lo mismo que su nonius en la figura 513 (III), tiene dos divisiones con un cero común, una de izquierda á derecha para los líquidos dextrogiros y otra de derecha á izquierda para los levogiros

Cuando el nonius está en el cero de la escala, la suma de los gruesos de las placas N y N' es precisamente igual al de la placa *i*, y como la rotación de esta última es contraria á la del compensador, el efecto es nulo. Pero si se mueven en un sentido ú otro las placas del compensador, éste ó el cuarzo *i* domina, y hay rotación á la derecha ó á la izquierda.

Después del compensador está un prisma birrefringente *c* (fig. 513, I) que sirve de analizador para observar el haz polarizado que ha atravesado el líquido y las diversas placas de cuarzo.

Operación. — Dejemos de lado por un momento los cristales y las lentes representadas á izquierda de aquéllos en el dibujo. Si se hace coincidir primeramente el cero del vernier *v* con el de la escala, y si el líquido contenido en el tubo es inactivo, las acciones del compensador y de la placa *i* se destruyen y, siendo nulo el efecto del líquido, las dos mitades de la placa *q*, vistas á través del prisma *c*, dan rigurosamente el mismo color, según se ha observado ya. Pero si se sustituye el tubo lleno de líquido inactivo por otro que contenga una disolución azucarada, el poder rotatorio de ésta se añade al de mismo sentido de uno de los

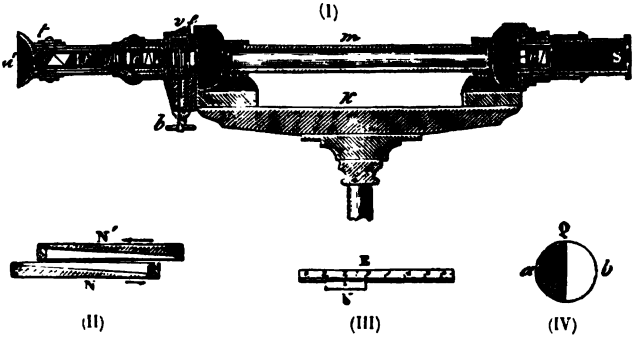


Fig. 513.

cuarzos de la placa de doble rotación *p*, y disminuye el poder rotatorio del otro cuarzo en otro tanto. De ahí resulta que ya las dos mitades de la placa *q* no presentan el mismo color, y que la mitad *a* (fig, 513. IV) es, pongamos por ejemplo, roja, mientras que la mitad *b* es azul. Entonces se ponen en movimiento los prismas del compensador, dando vuelta al botón *b* hacia la derecha ó hacia la izquierda, hasta que la diferencia de acción del compensador y de la placa *i* compense el poder rotatorio de la disolución, lo que ocurre cuando las dos mitades de la placa *q* de doble rotación vuelven á su tinte primitivo.

Cuanto al sentido de la desviación y al grueso del compensador, se les mide por el movimiento relativo de la escala *e* y del nonius *v*. Las divisiones de la escala son tales que 10 de ellas corresponden á una variación de 1 milímetro en el grueso del compensador, y como el vernier da á su vez los décimos de estas divisiones, resulta que mide variaciones de 1/100 de milímetro en el grueso del compensador.

2°. *Cálculo de la experiencia.* — Una vez que la coloración de las dos mitades de la placa *q* se ha hecho uniforme, como antes de la interposición de la disolución azucarada, se lee en la escala á qué división corresponde el vernier: el número indicado expresa inmediatamente la ley ó grado de la disolución. En efecto, hemos visto que con 16,35 g de azúcar candi, perfectamente seco y puro, disuelto en el agua, reducido el licor al volumen de 1 decilitro cúbico y observado en un tubo de 2 decímetros de largo, la desviación producida es precisamente la que corresponde á un grueso de cuarzo de 1 milímetro. Sentado esto, para analizar un azúcar bruto, se toma siempre un peso del mismo de 16,35 g que se disuelve en el agua, y habiendo reducido el volumen de la disolución á 100 centímetros cúbicos, se llena con ella el tubo de 20 centímetros de largo. Después se observa el número indicado por el nonius cuando se vuelve á dar con la coloración primitiva. Sea por ejemplo, 42; entonces se deduce que la disolución contiene, en azúcar cristalizable, 42 por 100 de lo que contenía la disolución de azúcar candi.

3°. *Demostración por la interversión.* — Este resultado no es exacto sino en tanto que se tiene la certeza de que el azúcar sometido á la experiencia no está

mezclado con azúcar no cristalizable, ó con cualquier otra sustancia levogira. Entonces se recurre á la *interversión* del azúcar con que se experimenta. Esta operación consiste en transformar por medio del ácido clorhídrico el azúcar cristalizable que es dextrogiro, en azúcar no cristalizable, que es levogiro; después se efectúa una nueva medida que, combinada con la primera, da la cantidad de azúcar cristalizable.

4°. *Productor de los tonos sensibles.* — Quédanos por dar á conocer el uso de los cristales y de las lentes *o*, *g*, *f*, *a* situados detrás del prisma *c* (fig. 512, I). Su conjunto forma lo que Soleil denominó el *productor de los tonos sensibles.* En efecto, el tono más sensible, quiere decir, el que permite distinguir una experiencia muy escasa en la coloración de las dos mitades de la placa de rotación, no es el mismo para todas las vistas : en la mayor parte de las personas es el tinte azul violáceo antes definido, que recuerda el de la *flor del lino.* El aparato de Soleil permite producir á voluntad el *tono sensible* ó cualquier otro matiz más sensible para el observador.

Con tal fin hay delante del prisma *c* primeramente una placa de cuarzo *o* tallada perpendicularmente al eje, y después un pequeño anteojo de Galileo formado por un vidrio biconvexo *g* y de un vidrio bicóncavo *f*, que pueden acercarse uno á otro, ó separarse según la distancia de la vista distinta del observador; por fin el aparato termina en un prisma de Nicol *a*, que se hace girar á voluntad sobre sí mismo. Como el prisma birrefringente *c* hace veces de polarizador respecto del cuarzo *o*, y el prisma *a* las de analizador, cuando se da vuelta á este último hacia la derecha ó hacia la izquierda, la luz que ha atravesado el prisma *c* y la placa *o* cambia de coloración y acaba por dar la que el experimentador ha adoptado como tono fijo.

501. **Sacarímetro de penumbras.** — En el sacarímetro de Soleil no pueden apreciar algunas vistas sin dificultad el instante preciso en que las dos placas *g* vuelven exactamente á su tono rosado-violáceo primitivo. Para remediar este inconveniente, Jellet imaginó el *sacarímetro de penumbras.* El alumbrado es producido en este aparato con una luz monocromática (el amarillo de la raya del sodio), y el polarizador es modificado de manera que la vista no tenga ya que comparar dos colores diferentes, sino dos intensidades de un mismo color, ó mejor dicho de dos penumbras; — pues la luz del sodio se apaga realmente en el aparato para no dar más que dos penumbras en el campo del ocular — : lo cual permite á la vista obtener mucho más exactamente las menores variaciones. De modo que lo que reemplaza el tono transitorio del sacarímetro de Soleil es la igualdad de estas dos penumbras; y entonces lo que da á conocer la riqueza del líquido azucarado es el ángulo de rotación que se necesita imprimir al analizador para igualar esas dos penumbras.

502. **Análisis de la orina de los diabéticos.** — En la enfermedad conocida por el nombre de *diabetes sacarina*, los orines están cargados de fuerte cantidad de azúcar fermentescible que se llama *azúcar de diabetes.* Este azúcar, en estado natural en los orines, hace girar á la derecha el plano de polarización. Para ver la cantidad que existe en las secreciones renales de un enfermo, se empieza por clarificar los orines con acetato de plomo, cuando están turbios; filtrase, llénase el tubo *m* con la orina clarificada, y después se da vuelta al botón *b* hasta que se obtenga para la placa de las dos rotaciones la misma coloración que antes de la interposición de la orina. Sábese por lo demás, por un ensayo previo, que 100 partes de la escala del sacarímetro representan el movimiento que precisa comunicar á los cuarzos compensadores cuando entran en la orima 226, 6 g de azúcar por litro; de ahí resulta que cada división de la escala representa 2,256 g de azúcar. Luego, para obtener la cantidad de azúcar contenida en la orina dada, basta multiplicar, 2,256 g por el número que indica el vernier en el momento de darse con la coloración primitiva.

CAPÍTULO VIII

FOTOGRAFÍA [1].

503. **Definición. — Historia.** — La fotografía [2] comprende el conjunto de los procedimientos y métodos que permiten fijar la imagen de los objetos por la acción de la luz en diferentes sustancias sensibles á esta acción.

Este arte es un descubrimiento francés : Arago presentó el 19 de abril de 1839 á la Academia los resultados de los trabajos comunes de Niepce y de Daguerre, reclamando para los dos inventores y sus herederos (Niepce había muerto en 1833) una recompensa nacional.

Daguerrotipia. — El procedimiento tomó el nombre de Daguerre, único que á la sazón vivía. Consistía en recibir la imagen dada por una lente convergente en una placa de cobre forrada de plata y hecha sensible por una exposición previa á los vapores de yodo.

La placa sensible se colocaba en un bastidor de madera, donde la cubría, por la parte de la plata, una pantalla de corredera. En este estado se la introducía en una pequeña cámara oscura portátil, llamada antaño el *daguerrotipo* (fig. 514).

Fig. 514.

Era una *cámara oscura*, de alargaderas, compuesta por una parte fija C y otra móvil B, que podía penetrar más ó menos en la primera (fig. 515). El *objetivo* se encuentra en un tubo de latón A. Al principio consistió en una lente única biconvexa acromática ; pero no se tardó en adoptar objetivos de dos lentes acromáticas L, L', que se llaman *objetivos de vidrios combinados*. En uno de estos daguerrotipos, y estando fija la lente L, se afocaba con la segunda lente L' sostenida en un tubo móvil que podía adelantar ó retroceder más ó menos gracias á una cremallera y un piñón D. La pared opuesta al objetivo es una pantalla de *vidrio sin pulimentar*, dispuesta en un marco E, fácil de retirar á voluntad.

Cuando era ya tiempo de poner término á la acción de la luz, se bajaba la pantalla de corredera, retirando el bastidor. Si en ese momento se miraba la placa, no se distinguía aún rastro ninguno de imagen ; para hacerla visible se exponía

1. Este capítulo ha sido revisado por M. A. Londe, jefe del servicio fotográfico en la Salpêtrière. Para los pormenores complementarios, consúltese el excelente tratado elemental de fotografía de dicho señor, publicado en París por la casa J. B. Baillière é hijos, con el título de *Aide-mémoire pratique de photographie*.

2. De φως, φωτός, luz y γράφειν, escribir. Es hablando en propiedad el *arte de escribir* ó de *dibujar por medio de la luz*.

la placa á la acción de *vapores de mercurio* á 75° C *próximamente*. Los vapores se depositan en gotecillas imperceptibles sobre las partes que han sido muy iluminadas, y al cabo de algunos minutos se forma una amalgama de plata que da los *blancos* ó *claros* de la prueba, mientras que las otras partes permanecen negras por efecto mismo del bruñido de la placa. Entonces la imagen es visible y puede quedar expuesta á la luz. Sin embargo, la placa sigue cubierta todavía de una capa de yoduro de plata, que comunica á la prueba tonos rojizos. Se la hace desaparecer lavando la placa en una disolución de hiposulfito de sosa.

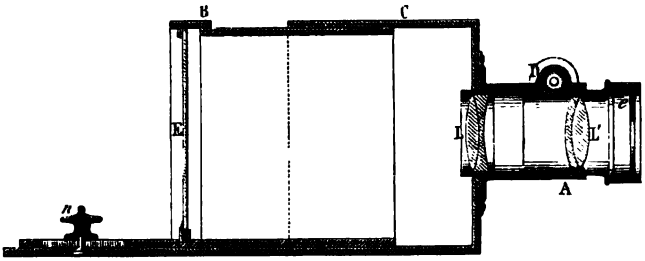


Fig. 515.

Este método presentaba el inconveniente de suministrar imágenes únicas, cambiantes é invertidas. Además, la duración de la impresión tenía que ser bastante grande y la resistencia de la imagen era muy escasa.

En los últimos tiempos de la daguerrotipia se había llegado á aumentar la sensibilidad de la capa por la formación sobre la placa de una mezcla de yoduro y de bromuro de plata, y también se logró consolidarla por un sistema de dorado con hiposulfito doble de oro y de sodio (Fizeau).

Después no se ha usado la daguerrotipia más que en observaciones que exigen gran precisión (paso de Venus, eclipses de Sol), y hoy está enteramente abandonada.

Observaciones. — 1°. *Coloración de ciertas pruebas daguerrianas.* — Es de observar que en este método la capa se presentaba en las condiciones descubiertas hace poco por Lippmann para la fotografía de los colores, y esto explica los ejemplos que se han mencionado de placas que reproducían los colores del modelo.

2°. *Imágenes latentes.* — Por otra parte, en el procedimiento de Daguerre es donde se ha observado por primera vez la *imagen latente* que aun siendo dibujada por la luz, permanece sin embargo absolutamente invisible y no aparece más que por la acción de reactivos particulares.

504. **Descubrimientos posteriores á la daguerrotipia.** — En 1840 indicó Fox Talbot la posibilidad de emplear sustancias que no fueran los vapores de mercurio para revelar la imagen latente, y obtuvo la *imagen negativa*, que permite tirar un número indefinido de *pruebas positivas*, con todos los rasgos del original y del mismo sentido que éste.

El procedimiento de Talbot, en que la capa sensible se extendía encima de papel, fué simplificado por Blanquard Evard en 1847.

En 1848, Niepce de Saint-Victor propuso el vidrio como substratum de la capa sensible, que está formada de gelatina ó de albúmina, primero yoduradas y después pasadas por el baño de plata.

En 1850, Fry y Archer reemplazaron la albúmina y la gelatina por el colodión, é indicaron el método del *colodión húmedo*, que constituyó progreso considerable.

En 1855, Taupenot indicó un procedimiento que permitía usar las preparaciones en estado seco. Este progreso era igualmente muy importante, pues permitía operar lejos del laboratorio. Dicho método fué perfeccionado y simplificado por el mayor Russell en 1861 y se conoce con el nombre de *procedimiento por el tanino*.

Finalmente, ya en 1851 preparaba Gaudin un líquido completamente sensible de antemano y que bastaba extender sobre la placa. Los trabajos en esta vía han sido numerosos y han conducido por una parte al procedimiento de *emulsión con el colodión seco*, y por otra al del *gelatino-bromuro de plata* (emulsión con la gelatina bromurada).

505. **Clasificación de los diversos procedimientos fotográficos.** — En resumen, todos los procedimientos de fotografía en papel ó en vidrio comprenden dos operaciones distintas. Por la primera se obtiene una imagen cuyos tonos están invertidos, quiere decir, en que las partes claras se ponen negras, é inversamente : esta es la *imagen negativa* ó el *negativo*. En la segunda operación, la primera imagen sirve para formar otra, cuyos tonos son invertidos de nuevo, quedando por consiguiente en su orden natural : esta es la *imagen positiva* ó *positivo*.

Estos diferentes procedimientos fotográficos pueden clasificarse según el modo como se prepara la capa sensible. Todos, excepto el de Daguerre, empiezan por dar *negativos* :

1°. Por vapores. . . . . — Dagurrotipia.

2°. Por remojado. . . . { Colodión húmedo. / Procedimientos secos. { Albúmina. / Colodión albuminado. / Colodión seco.

3°. Por emulsionado. — Emulsiones. . . . . { Colodión bromurado. / Colodión clorurado. / Gelatino-bromuro. / Gelatino-cloruro.

En el primer grupo se obtiene la sal sensible á la luz exponiendo una lámina plateada á la acción directa de los vapores de yodo.

En el segundo grupo se extiende sobre la placa un vehículo (colodión ó albúmina) que contiene yoduros ó bromuros alcalinos solubles, y después se introduce aquélla en un baño de nitrato de plata que por doble descomposición produce en el vehículo mismo los yoduros y bromuros de plata sensibles á la luz.

Cuando los nitratos alcalinos no son eliminados, la capa no conserva mucho tiempo sus propiedades y precisa utilizarla en seguida : tal ocurre con el colodión húmedo. Por el contrario, si se les expulsa por un lavado conveniente, la capa puede conservarse cierto tiempo. Esta duración aumenta por el uso de ciertas sustancias mucilaginosas ó tánicas llamadas *preservadores*.

En el tercer grupo se obtiene enteramente la sal sensible echando una disolución de nitrato de plata en la masa del vehículo elegido (colodión ó gelatina), que ya contiene los bromuros, cloruros ó yoduros; de esta manera se obtienen, por doble descomposición, nitratos alcalinos, — que se expulsan — y luego bromuros, cloruros, yoduros de plata, en estado de emulsión, que sólo falta extender en el soporte (vidrio ú otras sustancias). Las placas así obtenidas se emplean en estado seco y se conservan muchísimo tiempo.

El procedimiento de la emulsión con el gelatino bromuro ha hecho caer en el olvido la mayor parte de los anteriores. Dos únicamente han persistido, el de la albúmina, que permite obtener pruebas *diapositivas*, transparentes en vidrio para la proyección ó el estereoscopio[1] y el del colodión húmedo, que, por causa de su facilidad de empleo, de su delicadeza y transparencia, sigue siendo utilizado en la industria fotográfica.

506. **Procedimiento del colodión húmedo.** — Este procedimiento se funda en el empleo del colodión como vehículo de la capa sensible.

1°. *Preparación de la placa sensible.* — Ésta se encuentra constituída por una mezcla de yoduro y de bromuro de plata. El colodión *normal* es una disolución de algodón-pólvora en una mezcla de éter y de alcohol[2]; mezclado con cierta solución yodo-bromurada, compuesta de yoduros y de bromuros alcalinos susceptibles de transformarse en el baño de plata en yoduros y bromuros de plata, toma el nombre de colodión sensibilizado[3].

Para constituir el colodión sensibilizado, se toma

Colodión normal	90 partes.
Licor yodo-bromurado	10 —

Este colodión se extiende sobre la placa, previamente limpia con el mayor cuidado; desde que el éter y el alcohol se han evaporado lo bastante, se procede á la sensibilización propiamente dicha con la sal de plata; se efectúa en una habitación alumbrada con luz amarilla, introduciendo la placa en el baño de plata así constituído :

Nitrato de plata.	7 á 8 cm³
Agua destilada.	100 —
Yoduro de potasio.	alg. rastros.
Ácido nítrico	1 á 2 gotas.

La placa blanquea rápidamente por efecto de la formación de yoduro de plata : hay que retirarla cuando el baño corre libremente en su superficie sin dejar ya rastros aceitosos.

2°. *Exposición.* — La exposición debe efectuarse en seguida, pues desde que la placa seca, pierde todas sus cualidades; es de 20 á 30 veces más larga que con el gelatino-bromuro de plata.

3°. *Revelación.* — Para revelar, esto es, hacer que aparezca la imagen latente, basta proyectar sobre la placa una solución de sulfato de hierro añadida con ácido acético, según la fórmula siguiente.

Agua.	1000 g.
Ácido acético cristalizable	25 —
Alcohol á 36°.	51 —
Sulfato doble de hierro y amoniaco.	50 —

1. El método de la albúmina, que es muy delicado y exige ciertas manipulaciones hábiles, no es usado en la actualidad sino por muy contados operadores. Es el que Lippmann utiliza de preferencia para fotografiar los colores.

2. He aquí una buena fórmula del *colodión normal* :

Algodón-pólvora.	10 á 12 cm³	según la solubilidad.
Éter sulfúrico rectificado a 65°. . .	600 cm³	
Alcohol rectificado á 40°.	300 cm³	

3. He aquí la fórmula de este licor yodo-bromurado :

Alcohol absoluto (densidad : 0,795).	250 cm³
Yoduro de amonio.	10 g.
Yoduro de cadmio.	10 g.
Bromuro de cadmio.	10 g.

La imagen aparece inmediatamente [1].

4°. *Fijar la imagen.* — Esta operación se efectúa en una solución de hiposulfito de sosa (20 por 100) ó de cianuro de potasio (2 á 3 por 100).

Terminase con un lavado bien hecho, y después, una vez bien seca la capa, se la cubre con un barniz protector.

Observación. — Las ventajas del colodión húmedo son, además del escaso precio de coste, la facilidad de empleo, la pureza y transparencia de las imágenes obtenidas, y por fin la naturaleza de la capa; ésta puede separarse fácilmente del soporte en el caso de que se quieran obtener sean reuniones de negativos en un mismo vidrio, sean inversiones de sentido indispensables con ciertos procedimientos de tiradas industriales.

507. **Procedimiento del gelatino-bromuro de plata.** — Este procedimiento es hoy de uso general y si las aplicaciones de la fotografía á las diversas ciencias son cada día más numerosas é importantes, débese á su extremada sensibilidad.

Preparación de la emulsión. — La emulsión de gelatino-bromuro consiste esencialmente en un precipitado de bromuro de plata mantenido en suspensión en la gelatina. Este precipitado se obtiene por doble descomposición, añadiendo nitrato de plata á una solución caliente de gelatina que contiene ya un bromuro soluble. Después se eliminan los nitratos solubles por medio de un lavado.

Maturación. — La sensibilidad del producto obtenido aumenta por medio de una operación completamente particular que se llama la *maturación;* realízasela dejando ponerse vieja la emulsión, ó más rápidamente sea por la cocción, sea por la adición de pequeña cantitad de amoniaco. Sea cual fuere el procedimiento empleado, el máximum de sensibilidad se obtiene cuando el bromuro, que es blanco-amarillento, se vuelve verde por reflexión, habiendo pasado además su coloración por transparencia del amarillo anaranjado al gris violado.

Preparación industrial. — Las placas de gelatino-bromuro de plata se preparan en la industria por medio de máquinas especiales, que garantizan gran regularidad de fabricación y producción considerable. Ciertas máquinas pueden dar fácilmente de 20 á 30000 placas diarias del tamaño 13/18 [2].

Exposición. — La sensibilidad del gelatino-bromuro es muy superior á la de los demás procedimientos; esto se debe al empleo exclusivo del *bromuro de plata*, emulsionado en la gelatina.

Revelación. — Se funda en el uso de reductores enérgicos : entre ellos citaremos como más usados el oxalato ferroso, y después el

1. En el caso de que la intensidad de la imagen no fuera suficiente, se la *refuerza* lavándola por medio de la solución siguiente :

Agua destilada.	100 g.
Nitrato de plata.	3 g.
Alcohol.	5 g.
Ácido acético cristalizable.	5 g.

Entonces se hace actuar de nuevo el revelador, pero sin lavar más.

2. Las placas sensibles de gelatino-bromuro son fabricadas en la industria también, y tienen tan escaso precio, que el aficionado puede dispensarse de su preparación.

ácido pirogálico, la hidroquinona, la iconogenes y el paramidó-fenol adicionados con un álcali [1].

En la práctica se usan sustancias destinadas á retardar, ó por lo menos á impedir la combinación del reductor con el oxígeno del agua: tienen el nombre de *conservadores*.

Otras sustancias, tales como los bromuros y ciertos ácidos (cítrico, fórmico, tártrico), constituyen *retardadores*. Por fin, los *aceleradores* tienen como misión precipitar la aparición de la imagen.

1°. *Revelación con el oxalato ferroso.* — Se prepara :

A	Oxalato neutro de potasa	30 g.
	Agua destilada	100 —
B	Sulfato de protóxido de hierro	30 —
	Agua destilada	100 —
	Ácido tártrico	0,50

Para emplearlo, se vierte una parte de B en 3 partes de A. Agrégase previamente cierta cantidad de bromuro de potasio á 10 por 100 proporcionado á la duración de la exposición. En caso de que ésta sea normal, bastan 1 ó 2 gotas. Si la exposición es insuficiente, no se emplea bromuro, sino algunas gotas de una solución de hiposulfito de sosa á 1/1000.

La imagen aparece rápidamente y se la retira del baño cuando tiene todos los detalles, sin excluir las partes más oscuras y así que alcanza la intensidad requerida para dar buenos positivos.

2°. *Revelación con ácido pirogálico.* — En este caso, son necesarios los productos siguientes:

A	Ácido pirogálico en polvo.	
B	Sulfito de sosa	25 g.
	Agua	100 —
C	Carbonato de sosa del comercio	25 —
	Agua	100 —
D	Bromuro de potasio	10 —
	Agua	100 —

Por ejemplo : para un clisé 13/18, se forma un baño con

A	0,15 á 0,20 g.
B	20 cm³
D	alg. gotas.
Agua	80 cm³

Después de algunos instantes pasados en este baño, se añade la solución C por pequeñas dosis hasta que la imagen surja. Entonces se la deja subir tranquilamente, agregando álcali si los pormenores son insuficientes ó reductor si falta la intensidad.

Operaciones subsiguientes á la revelación. — 1°. *Fijar la imagen.* — Esta operación tiene por objeto eliminar las sales de plata no redu-

1. Numerosos cuerpos pertenecientes á la clase de los fenoles diatómicos ó triatómicos, de los naftoles, de los amoniacos compuestos, tienen las mismas propiedades.

cidas por la luz. Para ello se emplea una solución de hiposulfito de sosa á 20 p. 100. La placa debe permanecer en ella hasta que desaparezca todo aspecto lechoso de la capa.

2°. *Lavado.* — Después se procede al lavado muy largo que tiene por objeto eliminar de manera absoluta todo rastro de hiposulfito de sosa. La conservación de los negativos no puede obtenerse de otra manera.

3°. *Baño de alumbre.* — Después de fijar se suele hacer uso de un baño de alumbre destinado á endurecer la gelatina y hacerla imputrescible.

4°. *Secado.* — Debe efectuarse al aire libre, al abrigo del polvo y á temperatura moderada, so pena de hacer fundir la gelatina. Dura de seis á doce horas próximamente.

Secado rápido. — Basta introducir una placa en el alcohol metílico á 90°, durante cinco á diez minutos y después sacarla. Entonces se le puede secar por medio de suave calor.

508. **Operaciones accesorias. — Retocado del negativo.** — Si el negativo carece de detalles en algunas partes, no hay corrección verdaderamente eficaz, puesto que sería necesario reconstituir una imagen que no ha sido impresa por la luz.

En lo que se refiere á la intensidad del negativo, se la puede aumentar ó disminuir de manera general, si es demasiado pequeña ó considerable : la primera operación constituye el *reforzamiento*, la segunda la *rebaja*.

Reforzamiento con mercurio y con amoniaco. — Después de lavar bien el negativo, se le introduce en una solución de bicloruro de mercurio á 25 por 1000, hasta que la imagen aparezca enteramente blanca. Lávase abundantemente y se pasa por el agua un tanto amoniacal. El color de la imagen pasa al pardo oscuro, y adquiere notable intensidad. Termínase con un buen lavado.

Rebaja. — Se toman partes iguales de una solución de ferricianuro de potasio á 5 por 100 y de una solución de hiposulfito de sosa también á 5 por 100. La imagen desciende de manera regular y llega al punto apetecido. Se termina con un lavado abundante.

Retoque artístico. — El retoque tiene por objeto quitar los defectos procedentes sea del tema fotografiado sea del clisé. Efectúasele en el clisé negativo, por medio de un lápiz bien afilado, y en ocasiones con un pincel si se necesita acentuar más. Si el retoque debe hacerce en partes negras del negativo demasiado acentuadas que darían blancos demasiado crudos, entonces se recurre á una aguja con un mango, que permite marcar una serie de puntos muy ligeros ó de estrías en esas sombras que se han de atenuar.

Fig. 516.

Ejecútase esta operación en un bastidor especial llamado *de retoque* (fig. 516), que se compone de un vidrio G inclinado 45°, sobre el cual envía la luz del cielo un espejo M; así se puede juzgar bien por transparencia el valor del clisé y los efectos del retoque.

Este se hace también sobre la misma gelatina, á veces en el barniz, quiere decir, después que se cubre la gelatina con un barniz preservador. Si se quisiera hacer *morder* más al lápiz, podría aplicarse, sirviéndose del dedo, una composición especial de base de colofania y de esencia de trementina.

509. **Sustitución del vidrio como soporte de la capa sensible. — Placas peliculares y películas.** — El vidrio tiene inconvenientes serios, al lado de notables cualidades de transparencia y de lisura : son su peso, su volumen y su fragilidad.

Por otra parte, en el empleo de ciertos procedimientos de tirada de pruebas positivas, es necesario operar por la cara opuesta á la que ha recibido la impresión de la luz, de modo que se obtenga finalmente la imagen positiva en el verdadero sentido. Así es que desde hace mucho tiempo se ha tratado de separar fácilmente del vidrio la capa sensible, ó de pegar ésta sobre un soporte delgado, ligero y que no se rompa.

La interposición de una capa de colodión normal entre el vidrio y la capa sensible, permite separar ésta con la mayor facilidad. Las placas preparadas de este modo se llaman *placas peliculares.*

Las *películas* son nuevos soportes que han sido preparados para sustituir al vidrio : están constituídas por papel, colodión, celuloide ó gelatina insolubilizada. Se las prepara en hojas ó en rollos de gran tamaño. En el primer caso, se usan en vez de los vidrios en los bastidores ordinarios. En el segundo caso, necesitan bastidores especiales, los *bastidores de rodillos* (fig. 522).

Observación. — Las diferentes películas propuestas resuelven el problema desde el punto de vista de la transparencia, de la ligereza y de la no fragilidad ; pero en lo de lisura son inferiores al vidrio ; y en la práctica se necesita emplear aparatos especiales (extensores, etc.), para dar esa superficie perfecta. También ocurre con frecuencia que la adherencia entre el soporte y la capa no es suficiente y, por otra parte, las materias que constituyen el soporte reaccionan lentamente sobre el bromuro de plata y lo alteran poco á poco. En dos palabras, la solución no es perfecta todavía y exige nuevos perfeccionamientos.

510. **Material y manipulaciones fotográficas.** — Obtiénese la imagen en la cámara oscura sea por medio de una sencilla abertura muy estrecha, sea más frecuentemente por medio de un objetivo.

1°. *Fotografía sin objetivo.* — El primer procedimiento constituye la *fotografía sin objetivo ;* no es más que la aplicación directa de la experiencia clásica de Porta sobre la producción de las imágenes por las pequeñas aberturas. Este método es práctico actualmente gracias á la rapidez del gelatino-bromuro de plata. Con los antiguos métodos, las duraciones de exposición (que aun varían de algunos segundos á varios minutos) habrían sido demasiado grandes dada la escasa cantidad de rayos admitidos por aberturas que apenas tienen algunos décimos de milímetro.

Las imágenes obtenidas en estas condiciones carecen sin duda de precisión comparable á las que resultan con objetivos : pero presentan la preciosa ventaja de no quedar deformadas y de estar igualmente afocadas en los diversos planos.

2°. *Objetivos fotográficos y diafragmas.* — Los objetivos fotográficos están compuestos de uno ó de varios sistemas de lentes que son *acromatizadas* al mismo tiempo para los rayos violados y amarillos. Están provistos de *diafragmas móviles* de aberturas variadas que permiten aumentar la extensión del campo y la profundidad del foco (fig. 517 y 518).

Fig. 517.

Se puede clasificarlos según el ángulo abarcado : varía de 1° á 40° próximamente para los objetivos ordinarios, de 40° á 60° para los objetivos llamados *semi-grandes ángulos*, y de 60° á 110° para los objetivos llamados *grandes ángulos.*

La rapidez de un objetivo es definido al mismo tiempo por su abertura y su longitud focal principal [1]. También se clasifican los objetivos en *rápidos* ó *lentos*, según que el aplanetismo (403) más ó menos perfecto permite emplearlos á plena abertura ó diafragmados.

Diafragmas. — El uso de los diafragmas tiene por objeto eliminar los rayos periféricos ó demasiado oblicuos, y por consiguiente mejorar el aplanetismo del objetivo y la claridad de la imagen.

Un diafragma se compone esencialmente de una abertura circular más ó menos grande. Tal es el *giratorio* de la figura 517, que es un disco de varias aberturas, giratorio delante de la lente de un objetivo gran angular de corto foco y que permitirá fotografiar desde muy cerca los grandes monumentos [2].

Se emplea frecuentemente el *diafragma-iris* (fig. 518, I y II) : está formado de una serie de laminillas (I), que se pueden mover desde el

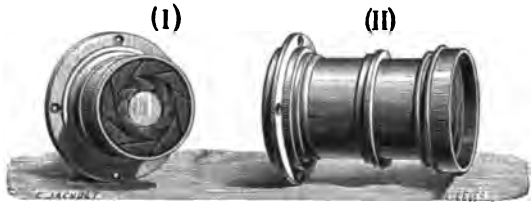


Fig. 518.

exterior de modo que se realicen todas las variaciones de abertura. La figura 518 (I y II) representa un diafragma-iris visto de cara y de lado.

Las disminuciones de diámetro del diafragma llevan consigo, por efecto de la supresión de cierta cantidad de luz, aumentos correspondientes en la duración de exposición. De las leyes generales de la variación de intensidad de la luz resulta que *el tiempo de exposición* varía para cada objetivo *en razón inversa* de la superficie de abertura [3] ó del cuadrado del diámetro de la abertura [4].

3°. *Cámaras oscuras y bastidores.* — El antiguo daguerrotipo (fig. 514) es reemplazado en la actualidad por cámaras oscuras llamados *de fuelle*. La parte móvil B está reunida con la fija C por medio de un fuelle de cartón, cubierto de tela negra, impermeable á la luz. Una base ó *cola ll* que sostiene la parte anterior y la posterior, permite acercarlas ó alejarlas para efectuar el afocamiento. La acción resulta así más extensa, al paso que la cámara es más ligera y portátil.

1. Según los acuerdos del Congreso internacional de Fotografía (1889 y 1891) el valor de la distancia focal del objetivo debe grabarse en la armadura, y el comprador tiene derecho á exigirlo.
2. Catálogo de la casa Marco Mendoza.
3. Con tal que la abertura sea circular.
4. Hay un *diafragma normal*, adoptado por el Congreso de Fotografía : es aquel cuya abertura tiene un diámetro igual al décimo de la distancia focal principal del objetivo.

La figura 519 (I) representa una cámara de fuelle provista de su objetivo O, montada sobre un trípode fijo SS, con su pantalla de vi-

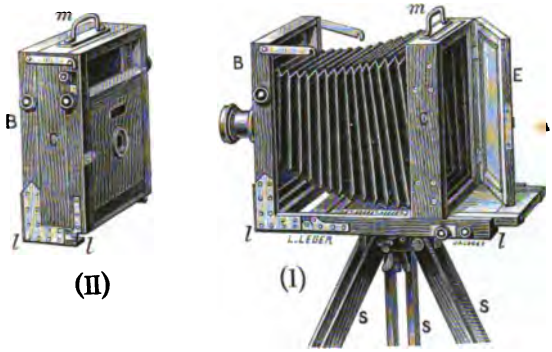


Fig. 519.

drio sin pulimentar E medio abierto. La parte (II) de la figura es la misma cámara desmontada y cerrada. Se la transporta fácilmente á mano cogiéndola por el asa *m*.

La figura 520 representa un aparato de campaña montado en su trípode de corredera, que puede plegarse, de modo que ocupe volumen muy reducido y muy portátil. En G está el saco que sirve para transportar la cámara.

4°. *Afocamiento.* — Se efectúa debajo de un velo negro, y tiene por objeto llevar el vidrio sin pulimentar del aparato al plano focal que corresponde al máximum de claridad.

Fig. 520.

5°. *Bastidores negativos.* — Una vez preparadas en el taller y en la oscuridad las placas sensibles, se las transporta á la cámara oscura sin que les dé la luz, por medio de aparatos es-

peciales llamados *bastidores negativos* ó sencillamente *bastidores*

Bastidores de ventanas. — Hay varios modelos: *el de ventanas* es el más usado. Hácesele siempre doble (fig. 521). Las placas están separadas por una pared opaca y mantenidas con pequeños tacos. Un

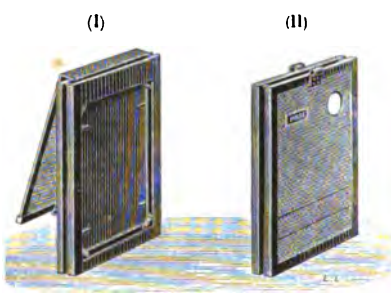


Fig. 521.

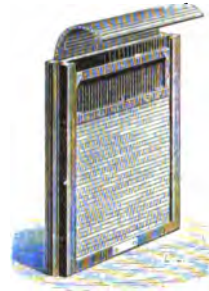


Fig. 522.

muelle de presión central aplica las placas contra los tacos y las mantiene en posición [1]. La figura 521 (I y II) representa un bastidor doble de ventanas, abierto (I) y cerrado (II).

Bastidores de cortinas. — También se fabrican *bastidores de cortinas* en que las ventanas, en vez de ser rígidas, son flexibles, por estar formadas de pequeñas laminillas de madera pegadas sobre tela. De manera que la ventana, en vez de salir del bastidor, va á alojarse en su parte superior (fig. 522). Esta disposición intercepta completamente la luz. El bastidor descrito se hace sencillo y doble. La figura 522 representa un bastidor de cortinas abierto en parte.

Fig. 523.

Bastidores de rodillos. — Por fin, hácense también bastidores de forma especial, llamados *bastidores de rodillos*, para el uso de las películas sensibles. La figura 523 representa el de la casa Marco Mendoza. Este aparato permite emplear papeles ó películas libres negativas ú otras sustancias sensibles en *carretillas*. Se le construye de manera que separa exactamente una de otra las pruebas sucesivamente impresionadas. Un cuadrante indicador *c* funciona automáticamente, y da á conocer el número de clisés impresionados. Por fin, un pequeño timbre avisa al operador en el momento que una nueva banda sensible reemplaza á la que acaba de ser impresionada.

1. Los tacos tienen el inconveniente de aflojarse con el uso. Hay, pues, que apretarlos de tiempo en tiempo.

6°. *Exposición.* — Después de cerrar el objetivo, se coloca en el aparato el bastidor que contiene la capa sensible, se le abre y se deja que actúe la luz durante un tiempo variable según las condiciones de la operación.

La *determinación del tiempo de exposición* es uno de los problemas más complejos de la fotografía, pues su solución depende de numerosos coeficientes: sensibilidad de la placa, abertura y foco del objetivo, distancia y coloración del modelo, actinismo de la luz, y éste depende á su vez de la latitud, de la estación, de la hora, del estado de la atmósfera, etc.

En la práctica se recomienda siempre que se procure *pasar* del tiempo normal que parece necesario. En efecto, siempre es posible, por la manera de revelar, corregir los tonos de una imagen *sobreimpresionada*, mientras que si la impresión ha sido insuficiente, si ha habido *subimpresión*, el fotógrafo más diestro es impotente á hacer surgir lo que la luz no ha impreso.

511. **Observaciones generales sobre el procedimiento del gelatino-bromuro de plata.** — *Luz del laboratorio.* — La preparación de las placas, su manejo y su revelación no pueden hacerse más que con luz roja. Así es que los cristales del laboratorio deben ensayarse con mucho cuidado en el espectroscopio. No deben dar paso á ningún rastro de verde ni de amarillo.

Naturaleza de la capa sensible. — La gelatina constituye como sostén una red cuya delicadeza no puede compararse con la de la albúmina ó del colodión; así es que la finura de la imagen y la transparencia son inferiores con el nuevo procedimiento. Además, el grueso del grano de bromuro de plata parece crecer con la sensibilidad, de tal manera que mientras más se exalta esta cualidad, más granulosa es la imagen. Pero estos inconvenientes tienen escasa importancia comparados con los nuevos estudios que han sido consecuencia directa del aumento de sensibilidad de las preparaciones fotográficas.

512. **Tirada de los positivos en papel: pruebas fotográficas.** — Obtenido que sea el clisé, trátase de reproducirlo en papel: esta es la segunda operación de la fotografía.

Los procedimientos de tirada de los positivos pueden dividirse en dos grandes clases:

1°. Los *procedimientos fotográficos*, en los cuales es necesaria la acción de la luz para obtener cada uno de los ejemplares. Los principales se fundan en el uso de las sales de plata, de platino ó de hierro ó en las propiedades particulares de la gelatina bicromatada (procedimiento del carbón).

2°. Los *procedimientos mecánicos*, en que la luz interviene únicamente para hacer una plancha que después se tira por los métodos ordinarios de la litografía, de la tipografía ó del grabado en madera. Su clasificación se efectúa según el caracter mismo de esta plancha.

513. **Procedimientos fotográficos: Procedimiento del cloruro de plata.** — 1°. *Preparación del papel sensible.* — En el comercio se encuentran diversos papeles preparados especialmente: papel salado, papel albuminado, gelatinado; también los hay sensibilizados.

El único que casi exclusivamente se usa es el preparado con la

albúmina de huevo, que produce ejemplares de gran delicadeza y de una riqueza de tonos notabilísima.

Pónese á flotar la hoja durante 3 á 5 minutos en un baño de nitrato de plata (á 10 ó 15 centésimos). Después de esto se la retira con una pinza, teniendo cuidado de observar primero (desde el principio de la operación) que no se han formado burbujas de aire entre el papel y el baño. El nitrato de plata forma cloruro de plata impresionable con el cloruro de sodio de que está impregnado el papel. Luego se deja secar el papel al aire en la oscuridad.

2°. *Tirada.* — Colócase el clisé en un bastidor prensa A (fig. 524). Este bastidor-prensa se compone de un marco de madera de encina, en cuyo fondo se encuentra dispuesto un espejo sin estañar

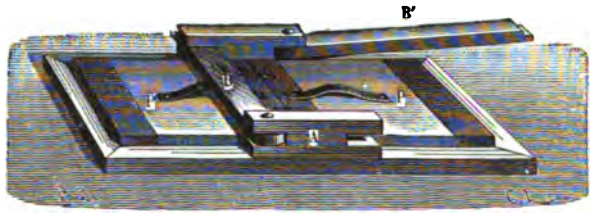


Fig. 524.

muy grueso, y además de una plancheta doble de charnela P y de dos cerradores de muelle *BB'*.

Colócase el clisé sobre el espejo, con la capa hacia arriba, y después el papel sensibilizado con su parte sensible hacia abajo. Encima de este papel se pone un cojinete ó colchoncillo de paño ó de papel, destinado á comunicar impresión igual á toda la superficie.

Dispónese la plancheta de charnela y se cierra el bastidor por medio de los muelles P y P'; gracias á la presión uniformemente repartida, el papel queda bien sentado sobre todos los puntos del clisé. Exponiendo el bastidor á la luz, se obtendrá una imagen *positiva*, quiere decir en que á cada parte blanca y transparente del clisé corresponderá una parte negra, y en que por consiguiente los valores ó tonos de la imagen del objeto fotografiado quedarán restablecidos.

De tiempo en tiempo se mira, levantando uno de los lados del bastidor, si la tirada *ha venido* suficientemente. Cuando la exposición es bastante, se retira la hoja y se efectúan las operaciones siguientes.

3°. *Lavado de las pruebas.* — Las pruebas se lavan con agua ordinaria durante algunos minutos, á fin de eliminar parte del nitrato de plata que retienen. Este exceso de nitrato tendría el inconveniente grave de ocasionar manchas en el virado y agotar rápidamente el baño.

4°. *Virado.* — El virado tiene por objeto, primero reemplazar la

plata reducida, que es alterable al aire, por oro, que es inalterable, y después dar á las fotografías un tono purpurino muy suntuoso, variable dentro de ciertos límites. El baño de virado se compone de una solución de cloruro de oro (á 1 milésimo), á la cual se añade una proporción variable de sales alcalinas, tales como los borato, acetato, carbonato de sosa, etc.

Conviene agitar constantemente las pruebas en el baño.

5°. *Fijar la imagen.* — Esta operación se efectúa dejando las pruebas de 10 á 15 minutos en un baño de hiposulfito de sosa (á 10 ó 15 centésimos) que disuelve el cloruro de plata no reducido por la luz en la exposición fotográfica; después se lavan las pruebas.

Observación. — Este lavado es una operación *esencial* para la conservación de las pruebas. En efecto, si quedaran en ellas algunos restos de hiposulfito, al cabo de cierto tiempo de exposición al aire húmedo se desprendería ácido sulfhídrico, que daría con la plata de la imagen un sulfuro de plata, el cual se transformaría lentamente en sulfato que, no obstante su escasa solubilidad, se disolvería poco á poco, acabando por desaparecer.

En otro tiempo se lavaba con dos ó tres aguas; hoy se lava en agua corriente por espacio de varias horas.

514. **Otros procedimientos fotográficos.** — 1°. *Procedimiento de las sales de platino.* — Este procedimiento se funda en la propiedad que tiene una mezcla seca de cloruro de platino y de oxalato de hierro de reducirse por acción de la luz, dando una imagen negra producida por el platino reducido. Se la revela en un baño caliente de oxalato de potasa, y después se la fija en una solución dilatada de ácido clorhídrico.

Este nuevo procedimiento permite obtener pruebas positivas enteramente inalterables y de mayor valor artístico que las precedentes. Además da medios de hacer indiferentemente clisés en papel, en madera, telas, marfil, etc.

2°. *Procedimiento de las sales de hierro.* — Tiene por base la acción de la luz sobre las sales férricas y la acción del ferrocianuro de potasio. Según el modo de operar, resultan imágenes *azules* sobre fondo *blanco*, ó *blancas* sobre fondo *azul*. Estos procedimientos se usan sobre todo en la industria para la reproducción directa de los planos dibujados en tela ó papel transparente. Por la acción del ácido gálico se pueden obtener pruebas *negras* sobre fondo *blanco* (Colas).

3°. *Procedimiento del carbón.* — Este procedimiento da imágenes muy artísticas y de gran estabilidad. Lo ha indicado Poitevin, á quien se debe por lo demás el descubrimiento de la mayor parte de las propiedades de la gelatina bicromatada. El principio en que se funda es el siguiente. Por acción de la luz, la gelatina bicromatada se hace insoluble en el grueso de la capa, proporcionalmente á la intensidad de la luz que la ha penetrado. Si en esta gelatina bicromatada pegada en papel se incorpora previamente una materia colorante estable en estado de polvos muy finos, las partes que se han hecho insolubles retendrán la materia colorante, proporcionalmente á la acción de la luz que atraviesa el negativo, mientras que las partes que siguen siendo solubles, desaparecerán por la acción de un disolvente apropiado (agua caliente). De manera que la imagen quedará constituída por gruesos más ó menos grandes de gelatina coloreada.

515. **Procedimientos mecánicos.** — 1°. *Impresión sobre superficie continua : Fotolitografía y fotocolografía.* — Cúbrese una superficie unida (piedra, zinc) con una sustancia sensible á la luz (betún de Judea, gelatina ó albúmina bicromatadas), y luego se la expone debajo del negativo[1]. Después de insolación, las partes no

1. Este procedimiento no puede aplicarse más que á la reproducción de los negativos de tonos sombreados : sólo pueden componerse de negros y de blancos.

insoleadas son disueltas en disolventes apropiados, y después se da tinta á la superficie como en los métodos litográficos. Aquí no interviene la fotografía más que para dar con mayor precisión el dibujo sobre la superficie litográfica: tal es la *fololitografía*.

En la *fotocolografía* se aisla debajo del negativo una capa de gelatina bricromatada, extendida sobre un vidrio ó soporte rígido, y luego se la lava abundantemente para que se elimine todo el bicromato. Bajo la influencia de la luz, la insolubilización de la capa es proporcional á los valores del negativo.

Si se da tinta á la plancha en estas condiciones después de mojarla, la tinta grasa no cogerá más que encima de las partes aisladas, proporcionalmente á su grado de insolación, mientras que será rechazada en las otras. Poniendo una hoja de papel sobre esa matriz, se tirará en la prensa. Este procedimiento es uno de los más perfectos indicados hasta hoy, pues permite reproducir con la mayor perfección los negativos de tonos sombreados.

2°. *Impresión sobre superficies discontinuas.* — Aquí tendremos que distinguir los procedimientos que dan planchas en relieve ó huecas.

Planchas en relieve. — Obtiénese en zinc por punto general, valiéndose del betún de Judea ó de la gelatina bicromatada, una matriz ó reserva que reproduce el dibujo (este procedimiento no se aplica sino á las líneas y no á las sombras). Hecho esto, se ataca el metal por medio de un disolvente, de modo que se obtenga el dibujo en relieve.

Entonces se disuelve la matriz y se da tinta á la placa montada tipográficamente, á fin de poderla intercalar en el texto de un libro impreso.

Para obtener por este procedimiento la reproducción de asuntos tomados del natural, que son de *modelos continuos*, se transforma á éstos en negativos que sólo tienen negros y blancos, mediante la interposición de tramas formadas por líneas y puntos; así se cambian las medias tintas en líneas discontinuas. — Entonces se puede tirar tipográficamente un negativo de esta clase. Este método, que sin duda se perfeccionará con el tiempo, llegará á tener mucha importancia en la ilustración, pues permitirá intercalar en el texto el documento fotográfico directo.

Planchas en hueco. — Trátase de obtener planchas en hueco análogas á las usadas en el grabado al agua fuerte. En general se opera con el cobre, trasladando á éste la imagen fotográfica. Una vez obtenida la matriz ó reserva, se ahonda por medio de un ácido más ó menos dilatado. La tirada se hace por los *impresores en madera*.

Otro procedimiento consiste en obtener sobre gelatina bicromatada un relieve que se moldea por los métodos galvanoplásticos.

Fotogliptia (procedimiento Woodbury). — Este procedimiento, absolutamente distinto de los anteriores, consiste en obtener, por medio de un relieve de gelatina producido debajo del negativo, un molde de plomo donde se vacía gelatina coloreada. Se sobrepone una hoja de papel, y se deja que la gelatina coja, después de haber ejercido sobre ella presión bastante con una prensa especial. La tinta es rechazada en las partes llanas que corresponden á los blancos, pero queda en los huecos más ó menos abundantemente según las profundidades, y de esta manera reproduce todos los tonos del original.

Este procedimiento, muy interesante y que da tonos variados, no se emplea casi pues no permite imprimir con márgenes y exige que se pegue cada prueba, lo mismo que en el procedimiento ordinario del cloruro de plata.

516. **Fotografía instantánea.** — En la fotografía instantánea se pueden incluir todas las aplicaciones en que la duración de impresión se reduce á *un instante*, quiere decir, á un fragmento de segundo extremadamente pequeño, ya gracias al empleo de un órgano especial llamado *obturador*, ya por el hecho de que la placa reproduce un fenómeno que es *instantáneo*.

Para obtener en estas circunstancias imágenes satisfactorias, será necesario combinar las diversas condiciones de la experiencia: sensibilidad de la capa fotográfica, rapidez del objetivo (caracterizada

por su foco y su abertura), iluminación del modelo, energía de la revelación.

I. *Obturadores.* — Llámase *obturadores* á unos aparatos que tienen por objeto no dejar entrar la luz sino durante tiempo muy corto, que debe ser siempre el mismo para un mismo grado de arreglo. El número de obturadores es muy grande. Puede incluírseles en tres clases.

1°. El *obturador de ventana* (simple ó doble) está constituído por una ó varias ventanas, que pueden ser independientes unas de otras ó solidarias entre sí (ejemplo : tipo Guerry, fig. 525).

2°. El *obturador lateral*, que se compone de laminillas taladradas por agujeros rectangulares ó en forma de sector que pasan rápidamente delante del objetivo con movimiento rectilíneo ó circular (tipos : obturador guillotina ; obturador Londe y Dessoudeix).

La figura 526 representa uno de los tipos de *obturadores Londe* y *Dessoudeix*. Es todo de metal y se coloca entre las dos lentes del objetivo, lo que reduce mucho su volumen. El obturador propiamente dicho O tiene la forma ovoidal. Está

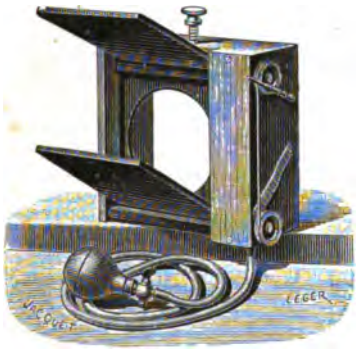


Fig. 525.

Fig. 526.

provisto de dos manecillas : una pequeña *m*, que sirve para armar el disco de obturación, y otra mayor, M, destinada á tender más ó menos el muelle que arrastra consigo al disco, y por consiguiente á proporcionar diferentes velocidades de paso. Esta manecilla se mueve sobre una semi-corona que lleva una serie de topes numerados 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Uno de los topes tiene como inscripción la palabra *exposición* : es la posición en que ha de ponerse la manecilla cuando se quiere efectuar el afocamiento ó una impresión que dure algo ; pues el obturador es *mixto*, quiere decir que permite las impresiones instantáneas ó más largas. *Ármase* el obturador poniendo la manecilla en uno de los topes numerados : la velocidad es tanto mayor cuanto más alto es el número ; en el n° 1 se tiene 1/15 de segundo ; en el n° 6 1/120.

Á veces este género de obturador exige dos laminillas que andan en sentido inverso (tipo Thury y Amey).

3°. *Obturador central.* — Este obturador está formado de laminillas que constituyen una abertura casi circular, regularmente creciente y menguante, completamente análoga al diafragma-iris (tipo Dallmeyer).

Observación general. — Estos diversos géneros de obturadores se colocan, ya delante, ya detrás del objetivo, según su modo de construcción, y aun en un plano tan inmediato á los diafragmas como sea posible.

Se les gobierna generalmente por un descalzamiento neumático, que funciona por la presión de una pera de caucho (fig. 525 y 526).

4°. *Obturador de cortina.* — Un tipo último de obturador consiste en una cortina

ó pantalla agujereada por una hendidura estrecha, que se hace funcionar contra la placa misma. (Uno de esos es el que usó Janssen para la fotografía del sol, y Marey para el estudio del movimiento). Es el que permite obtener duraciones de exposición más cortas.

II. *Aplicaciones de la fotografía instantánea.* — La fotografía instantánea permite reproducir con éxito los más diversos objetos en movimiento : personajes, animales, fenómenos naturales, olas, cascadas, nubes, etc. Ni siquiera se necesita que el aparato fotográfico esté instalado sobre un pie sólido, como en otro tiempo; opérase á mano con gran perfección. Hasta puede ocurrir que el operador esté á su vez en movimiento, sea en un barco, coche, tren ó globo, y que la fotografía resulte bien.

Fig. 527.

517. **Fotocronografía.** — Si bien las pruebas instantáneas simples tienen un interés artístico, documentario ó científico, no por esto dejan de ser á menudo incompletas, pues es imposible abarcar en su conjunto el movimiento que se desea estudiar, y una prueba única no proporciona sino una fase del movimiento tomada al azar. El *método fotocronográfico* tiene por objeto tomar fotografías sucesivas á intervalos regulares, de modo que resulte posible el análisis riguroso de un movimiento, sea el que fuere.

1°. *Experiencias de Muybridge.* — La aplicó por primera vez en América Muybridge, quien estudió los distintos aspectos de los animales y sobre todo del caballo : éste fué reproducido al paso, al trote corto, al trote largo y al galope, con velocidad de 1142 metros por minuto. También se efectuaron con un caballo al trote enganchado á un tilbury. La velocidad era de 715 metros por segundo.

2°. *Experiencias de Marey.* — Marey ha procurado con los diversos aparatos que ha venido ideando desde 1883 á la fecha (1894) obtener imágenes en intervalos de tiempo rigurosamente iguales, lo que constituía un progreso sobre el método de Muybridge. Los resultados son de gran precisión y se puede revelar la trayectoria en el espacio de un objeto que se mueve, en función del tiempo.

Para anotar el tiempo transcurrido entre la obtención de dos pruebas sucesivas, se coloca sobre el mismo fondo negro que el modelo un cuadrante graduado y una aguja blanca que da una vuelta por segundo. Á cada fotografía es reproducida la aguja y el tiempo se mide por el ángulo existente entre cada una de las imágenes sucesivas de la aguja.

Los estudios de Marey han tenido por objeto la marcha, el salto, la carrera, los distintos pasos del caballo, el vuelo de las aves, el nadar de los peces, etc. También aplica su método al examen de los infinitamente pequeños que no es posible ver más que con el microscopio ; al registro de fenómenos fisiológicos variados : marcha de la sangre en los vasos, movimientos del corazón y, últimamente, las vibraciones de los líquidos, etc.

3°. *Experiencias de Anschutz.* — Anschutz ha llegado á obtener igualmente en Alemania brillantes resultados con un aparato análogo al de Muybridge, pero que funciona eléctricamente á intervalos de tiempo rigurosamente iguales, con obturadores de pantalla.

4°. *Experiencias de Sebert y de Londe.* — El general Sebert ha estudiado en Francia, valiéndose de aparatos especiales, diversas cuestiones de balística (disparo de los torpedos, etc.) y A. Londe los problemas fotocronográficos relativos á la fotografía médica.

5°. *Síntesis del movimiento.* — El análisis del movimiento es ya un hecho; por esto se ha tratado de obtener su síntesis utilizando las vistas fotocronográficas

Fig. 528.

por medio del zootropo, del fenakisticopio y otros instrumentos análogos. Los resultados obtenidos por Marey, Demény, Anschutz son muy notables.

518. **Otros resultados obtenidos por el medio de las impresiones muy rápidas.** — Además de la reproducción de fenómenos que por su rapidez escapan á la vista, la fotografía instantánea permite registrar, gracias á impresiones muy rápidas, pormenores que de otro modo no sería posible distinguir.

1°. *Experiencias de Janssen.* — Janssen, ha podido, reduciendo la impresión á $\frac{1}{3000}$ de segundo, reproducir diversos pormenores de la superficie solar relativos á la estructura del núcleo y la penumbra, las fáculas, las arrugas, las manchas de la fotosfera, etc.

2°. *Experiencias de Angot.* — Análogamente, Angot ha obtenido los más delicados pormenores de ciertas masas nubosas muy ligeras que se confunden con el azul del cielo.

3°. *Fotografía de los relámpagos y chispas eléctricas.* — *Experiencias de Trouvelot.* — Los resultados obtenidos en estos casos particulares han sido muy fecundos en lo relativo á la forma y duración de estas manifestaciones eléctricas. Así se ha podido ver que el relámpago no afecta nunca la forma de ziszás que siempre se le ha atribuído, y que su duración no es tan corta como se pensaba (fig. 527).

Cuanto á la forma de la chispa eléctrica (fig. 528), Trouvelot la ha indicado de manera perfecta.

519. **Ampliaciones fotográficas.** — En fotografía se necesita muchas veces ampliar los clisés. En este caso existen dos métodos distintos.

1°. Se empieza por preparar un clisé positivo en vidrio del negativo que se desea ampliar. Opérase sea directamente por *contacto*, sea en una cámara oscura

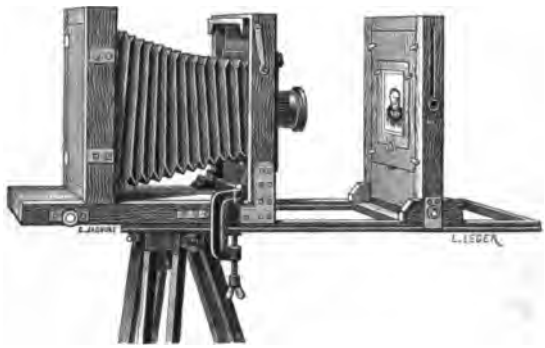


Fig. 529.

por *transparencia*. Con este nuevo clisé positivo se obtiene por *transparencia* (fig. 529) en la cámara oscura un clisé *ampliado* y *negativo*. Empléase el último para hacer la tirada de las pruebas.

2°. En ciertos casos es preferible, tanto por lo que se refiere á la claridad como á la rapidez, servirse de papel preparado al gelatino bromuro. La imagen ampliada del clisé negativo es proyectada por medio de la luz solar ó artificial sobre una pantalla donde está dispuesto el papel sensible. Se revela como de costumbre, y así se obtienen ampliaciones muy hermosas.

Fig. 530.

520. **Fotografía con luz artificial.** — Gracias á los progresos realizados en la sensibilidad de las preparaciones fotográficas, es posible operar hoy muy fácilmente con focos de luz artificial, eléctrica, magnesio, etc.

Éste último, usado en estado de polvos impalpables, solo ó con sustancias oxidantes (fig. 530) y proyectado en una llama, da relámpagos de considerable intensidad, lo cual ha permitido operar en sitios mal alumbrados ó

completamente oscuros : interior de las casas, teatros, grutas, cavernas, etc.

521. **Degradados fotográficos.** — Ciertas fotografías sobre fondo blanco adquieren mayor mérito artístico por medio del degradado, que tiene como fin aumentar el parecido entre la fotografía y el grabado ó un dibujo al lápiz. Llégase fácilmente á obtener dicho resultado disponiendo sobre el vidrio del bastidor que contiene el clisé, un degradador (fig. 531, I, II), quiere decir, un vidrio en el cual se pegan hojas transparentes de papel cortadas formando dientes. La luz cernida por este degradador pasa insensiblemente del blanco al negro, y da un fondo blanco, pues toda la parte del degradador es negra é impermeable á la luz.

También se recurre á vidrios amarillos degradados.

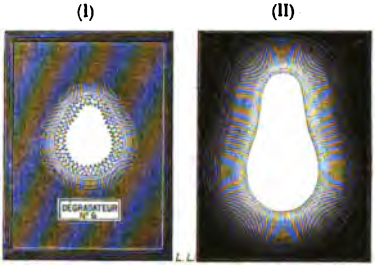


Fig. 531.

522. **Fotografía micrográfica.** — Es una nueva rama de la fotografía, que estudia los dos problemas siguientes :

1°. Fijar, mediante procedimientos fotográficos ordinarios, las imágenes ampliadas de los objetos microscópicos (*fotomicrografía*).

2°. Obtener imágenes microscópicas de objetos de magnitud ordinaria, de modo que se reuna gran número de pruebas en un espacio reducido.

1°. *Fotomicrografía.* — El conjunto de los procedimientos y aparatos que resuelven el primer problema constituye la *fotomicrografía* La disposición más sencilla se

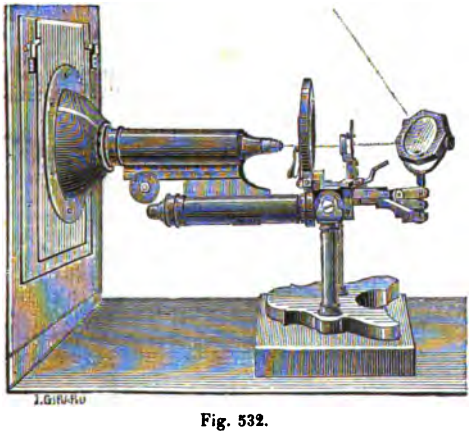


Fig. 532.

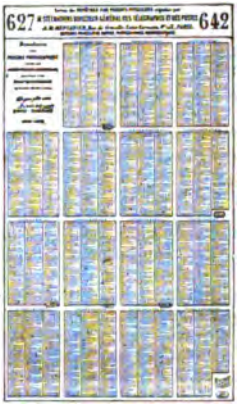


Fig. 533.

debe á Girard. Reemplázase el objetivo ordinario de una cámara oscura por un microscopio (fig. 532) [1] y se ilumina bien con un espejo el pequeño objeto, cuya

1. Sábese que en estas condiciones el microscopio ordinario puede suministrar *imágenes reales* ampliadas, y rectas respecto del objeto.

magen agrandada va á proyectarse en la pantalla de la cámara oscura y á imprimirse en la placa sensibilizada. La continuación de las operaciones fotográficas se efectúa como de costumbre. Este método se aplica á todas las investigaciones micrográficas, pues permite fijar sus descubrimientos y estudiarlos de modo permanente.

2°. *Pruebas microscópicas.* — La segunda cuestión ha sido resuelta primeramente por los métodos y aparatos de Bertsch, completados y perfeccionados más tarde por Neyt, Dagrón, Moitessier y J. Girard. Así se han logrado obtener esas imperceptibles fotografías, que se engarzan en una armadura cualquiera y que miradas con el vidrio de aumento adquieren las proporciones de las pruebas ordinarias.

Por este método se expidieron desde París á las provincias de Francia, durante el asedio de 1871 largos y voluminosos despachos reducidos á una superficie microscópica y á un peso minúsculo. Dagron usaba delgadas películas de colodión, bastante sensibles para no exigir sino *dos segundos* de impresión. En cada una de ellas se podían fotografiar de 12 á 16 páginas en folio, que contenían por término medio 3000 despachos; 18 de estas hojas, introducidas en un tubo de pluma, pesaban próximamente medio gramo y constituían la carga de una paloma viajera. La figura 533 es el facsímil de uno de esos despachos. Cuando llegaban á su destino se les amplíaba, proyectándolos en una pantalla, por medio de microscopio foto-eléctrico.

FOTOGRAFÍA ORTOCROMÁTICA Y HELIOCROMÍA.

523. **La fotografía ortocromática. — Las placas isocromáticas.** — La fotografía actual tiene un grave defecto: da imágenes en que los *valores* se reproducen mal, estando en cierta manera invertidos: el *azul*, que es el más oscuro de los colores, resulta *blanco*; el *amarillo*, el *verde*, el *rojo* salen *negros*. Por esto es que en un positivo fotográfico ordinario no se ve en claro más que el *azul* que resulta *blanco*, y el *blanco* (porque éste contiene *azul*); cuanto á los demás colores, sólo aparecen en razón de la parte de azul que contienen. Y la causa de esta anomalía es inherente á la naturaleza misma de las sustancias sensibles. Siendo la placa fotográfica muy sensible á los rayos azules y muy poco á los demás rayos, sucede que el tiempo de exposición, bastante largo para el azul, es insuficiente para los demás colores [1].

El primer método propuesto para corregir esta imperfección fué el uso de placas llamadas *isocromáticas*. Se da este nombre á placas cuya sustancia sensible ha sido añadida con ciertas materias tintóreas que aumentan su sensibilidad para tal ó cual radiación coloreada, y principalmente para las menos activas. Attout-Tailfer y J. Clayton fueron los primeros prácticos que obtuvieron industrialmente placas isocromáticas, introduciéndolas en el uso ordinario. Eran éstas de gelatino-bromuro sensibilizadas con *eosina* para el verde-amarillo. También se preparan placas isocromáticas de colodión húmedo y de colodión seco. Se las sensibiliza con ayuda de gran número de sustancias. Citaremos, por ejemplo, la *cianina*, que sensibiliza para el *rojo* y el *anaranjado*; la *eritrosina*, para el *amarillo*; la *salicina*, para el *verde* y el *encarnado*.

524. **Fotografía ortocromática: Método de G. Lippmann.** — Pero estas placas distan todavía mucho de la placa isocromática ideal, quiere decir, de la que tendría sensibilidad cromática *igual á la de la retina*; únicamente esa podría dar en valores exactos los tonos de los objetos fotografiados. Mientras llega el momento de poder realizarla, es posible sacar partido muy superior de las placas existentes, gracias á un método de Lippmann, que consiste esencialmente en el empleo racional y sistemático de una serie de vidrios de colores.

Después de haber colocado en la cámara oscura una placa Attout-Tailfer, se pone un *vidrio azul* delante del objetivo y se deja exponer el tiempo necesario para que los rayos *azules* de la imagen impresionen la placa. — Luego, sin tocar al aparato y cuidando bien de no moverlo, se reemplaza el vidrio azul por otro *verde* [2], y se continúa exponiendo tiempo bastante para que á su vez el *verde* im-

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*: sur l'obtention de la photographie en valeurs justes por G. Lippmann.

2. De verde muy puro, sin rastro ninguno de azul.

presione fuertemente la placa. — Por fin, llega el turno á los rayos rojos. Háceseles actuar sustituyendo delante del objetivo el vidrio verde por uno *encarnado*.

El resultado final de este método « de triple exposición », es dar fotografías ortocromáticas, quiere decir *claras*, sin *manchas oscuras*, en las cuales los árboles *verdes*, los cortinajes *amarillos*, etc., en vez de dar tonos oscuros, son representados por un dibujo finamente sombreado, como en un grabado bien hecho.

525. — **Fotografía de los colores.** — 1°. *Enunciado del problema.* — Sábese que la imagen de los objetos iluminados, proyectada por el objetivo sobre el vidrio sin pulimentar de la cámara oscura, es la reproducción exacta de la forma y color de estos objetos. Ahora bien, la prueba fotográfica no reproduce más que la forma y el modelado de esta imagen : el color desaparece.

El problema de la *fotografía de los colores*, ó *heliocromía*, consiste en reproducir el color de la imagen proyectada, á la vez que sus líneas y sombras.

2°. *Historia de la solución.* — *Experiencias de Becquerel.* — Cada vez que los físicos quieren operar con la luz de color en condiciones simples y bien definidas hacen uso del espectro solar, pues únicamente él está formado de rayos simples : todas las demás luces de colores son mezclas de esos rayos simples. Edmundo Becquerel obtuvo por primera vez en 1848 una imagen fiel del espectro solar. Este profesor tuvo la idea de tomar una lámina de *plaqueado de plata*, preparada de modo especial. En vez de sensibilizarla con yodo, según hacía Daguerre, empleó el cloro. Convertida de esa manera dicha superficie en cloruro *violado* de plata, y expuesta después á los colores de un espectro solar durante tiempo suficiente, tomó directamente el color de estos rayos. Pero esa imagen coloreada no podía conservarse más que en la oscuridad. Exponiéndola á la luz del día, se puso enteramente blanca. El problema no estaba resuelto.

Experiencias de Poitevin. — Poitevin siguió á Becquerel en el mismo procedimiento, aunque con modificaciones secundarias. En vez de depositar el subcloruro violado sobre una placa de plata, lo ponía sobre papel ; además, lo empapó de bicromato de potasa, aumentando así su sensibilidad. Pero tampoco logró fijar los colores de las imágenes.

Experiencias de Carlos Cros y de Ducos de Hauron. — Después de estos trabajos, parece que se renunció por espacio de más de veinte años, á resolver directamente el problema.

En 1869, C. Cros y Ducos de Hauron imaginaron separadamente un método indirecto para obtener *imágenes fotográficas de colores*. En principio ambos inventores procedían de la misma manera.

Tiraban primero tres clisés incoloros del objeto que se deseaba reproducir ; después, por medio de métodos conocidos, hacían con esos tres clisés negativos tres pruebas positivas que teñían separadamente de tres colores diferentes, obtenidos sea por ejemplo con tres tintas grasas coloreadas. Superponiendo después estas tres imágenes que son monocromas, se realizaba una policroma, que reproducía sensiblemente los tonos y matices diversos del objeto coloreado. Este método era análogo á la cromolitografía con la diferencia de suprimir el trabajo de los dibujantes, reemplazándolos por la fotografía. En cambio no resolvía de ningún modo el problema, puesto que directamente sólo daba clisés incoloros. El color no era introducido sino posteriormente, y su elección resultaba más ó menos arbitraria, pues había que subordinarla á la calidad de las tintas grasas usadas.

526. **Fotografía de los colores : Descubrimiento de G. Lippmann.** — 1°. *Dispositivo experimental.* — Lippmann ha obtenido recientemente una solución completa y definitiva del problema de la fotografía de los colores, por medio de un método simple y racional, enteramente distinto de los procedimientos empíricos de sus predecesores.

Partió de la teoría de la luz para definir *a priori* las condiciones en que precisa colocarse para obtener clisés coloreados, mediante la aplicación directa de los procedimientos fotográficos ordinarios. Estas condiciones son dos :

1°. Precisa que la capa sensible sea *continua*, y no formada, como las emulsiones ordinarias, por pequeños granos metálicos dispersos en la capa de gelatina.

2°. Precisa que esta capa sensible esté pegada á una superficie reflectora que forme espejo.

Lippmann realiza la primera condición sensibilizando en un baño de nitrato de plata una capa, sea de colodión, sea de albúmina, sea de gelatina, impregnada

de bromuro, ó de cloruro, ó de yoduro de potasio. La superficie reflectora pegada á la capa sensible la obtuvo poniendo detrás de ésta, y en contacto con ella, una capa de mercurio.

Con tal fin imaginó un bastidor especial (fig. 534) en forma de artesa plana EEGV, constituida muy sencillamente, primero por la placa sensible cuya cara desnuda G está vuelta hacia el objetivo, y después por una contra-lámina de

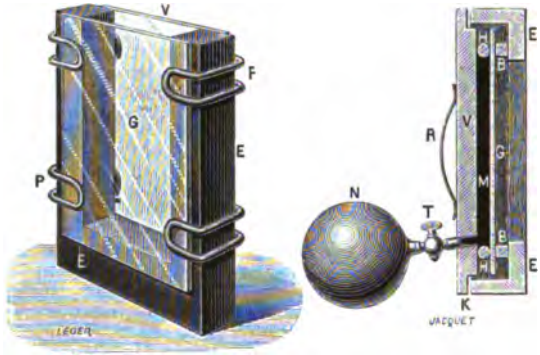


Fig. 534. Fig. 535.

vidrio ordinario V, que forman las dos caras opuestas; están unidas por medio de abrazaderas de latón PP, por mediación de un marco de ebonita EEE, que forma las paredes. En esta artesa, perfectamente cerrada, es donde se echa el mercurio que sirve de espejo.

Preparado de esta manera el bastidor, se le expone en E por su cara G á la acción directa de un *espectro solar*, procedente de un arco voltaico (fig. 535). En R se ve el regulador, en L, L_1 y L_2 lentes destinadas á concentrar la luz solar,

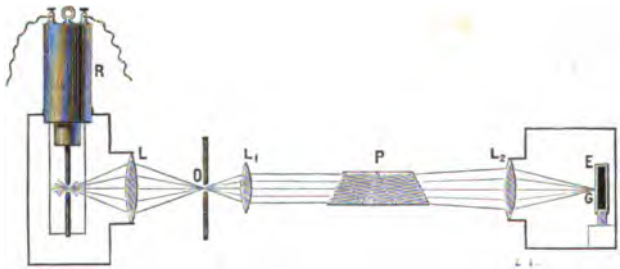


Fig. 536.

que ha penetrado por la rendija O de una pantalla, sobre un *prisma de visión directa* (fig. 536) P, que dispersa la luz sin desviarla y que proyecta en G un espectro puro.

Cuando termina la exposición, se vacía la artesa y se retira la placa sensible que sólo estaba mantenida contra las paredes por la presión [1]. Entonces se la

1. Esta manipulación se ha hecho más fácil gracias á un perfeccionamiento recientemente introducido en la cuba de Lippmann por la casa Lumière. La cuba V se coloca en un verdadero bastidor de madera EE cuyas paredes son mantenidas en su sitio (fig. 535) por medio de un muelle metálico R. La pared posterior del bastidor lleva en sus bordes otra guarnición de caucho flexible HH para formar los contactos. La cara anterior G presenta una pieza

revela, fijándola por los métodos ordinarios (ejemplo, con ácido pirogálico y carbonato de amoniaco y después con hiposulfito de sosa). Á medida que la placa va secándose aparecen en ella los colores del espectro. Se les ve muy bien por reflexión, disponiendo el clisé sobre un fondo negro y mirándolo á la luz difusa.

Estos colores son perfectamente fijos y absolutamente inalterables á la luz.

2°. *Teoría del método Lippmann* [1]. — Los colores así obtenidos en la placa son muy brillantes. ¿ Cuál es su naturaleza ?

El depósito que resulta de la acción fotográfica se compone de *plata reducida*, como en un clisé ordinario, pues se le ha obtenido por medio de los reactivos usuales. De modo que *no tiene color por sí mismo*. El color se debe á una razón puramente física. Este depósito de plata, producido por las acciones combinadas de la luz directa y de la luz reflejada en el espejo, ha tomado una estructura laminar de donde resulta en su masa por *interferencia*, el fenómeno de coloración llamado de las *láminas delgadas* ó de los *anillos coloreados*.

Hemos visto que el color tomado por una lámina delgada depende de su grueso : á medida que éste va disminuyendo se observa por reflexión y sucesivamente, rojo, verde, azul y violado. El color reflejado en una lámina delgada es aquel cuya semi-longitud de onda iguala al grueso de la lámina. Ahora bien, la luz que ha impresionado la capa sensible, durante la exposición en la cámara oscura, se ha estratificado en su grueso, por efecto de la presencia del espejo de mercurio. Como cada onda luminosa es reflejada sobre sí misma por este espejo, ha habido interferencia entre la onda directa y la reflejada. En ciertos planos la acción de las ondas se ha sumado y de este modo se han producido máximas luminosas : ahí es donde se han depositado después las capas de plata reducidas.

En otros planos intermedios las acciones de las ondas luminosas se restan unas de otras y se anulan : en todos estos puntos el efecto fotográfico ha sido nulo y después de la revelación sólo ha quedado gelatina pura.

Resumiendo, la acción fotográfica no ha hecho más que fijar, materializándola por medio de un depósito de plata, la posición de cada máximum de acción luminosa. Ahora bien, estas máximas están separadas por distancias iguales á una semi-longitud de ondulación de cada luz, y tal es la razón de que las láminas delgadas usadas tengan precisamente este grueso. La vibración luminosa se ha vaciado, digámoslo así, por vía fotográfica, en el espesor de la placa impresionada [2].

El depósito de la plata reducida se ha estratificado como el haz luminoso que le dió origen. Compónese de una serie de láminas de plata equidistantes, y que separan la albúmina ó la gelatina que les sirve de soporte ó sostén en capas delgadas superpuestas. Según la teoría misma de los anillos coloreados, donde vemos *rojo* es porque la distancia entre dos capas de plata sucesivas es igual á una semi-longitud de ondulación del *rojo* ; y si más lejos distinguimos *verde*, es porque en este punto la estratificación es más compacta y porque la distancia de las capas de plata consecutivas es igual sólo á media longitud de ondulación verde. Y lo mismo ocurre con todas las demás partes del espectro.

Cuanto al brillo de los colores observados en los espectros fotografiados de Lippmann, se debe al número considerable de las láminas superpuestas en cada región, y cuyos efectos se sumen. Es posible formarse idea aproximada del número de estratos que se producirían en una capa de gelatina de 1/10 de mm de

BB, provista igualmente de un caucho, contra la cual se aplica la placa sensible G. En la parte inferior de la cuba M penetra á través del bastidor un tubo abductor, que comunica con una pera de caucho N llena de mercurio. Basta comprimir ó soltar la pera para llenar ó vaciar de mercurio la cuba á voluntad y fácilmente.

1. Véase la *Science moderne* del 3 de Marzo de 1891 : *Conférence faite par M. G. Lippmann au Conservatoire des Arts et Métiers.*

2. Esta teoría puede compararse con la del fonógrafo. Efectivamente, el sonido está constituído por vibraciones que toman cuerpo, que se vacían en la capa de cera fonográfica, dejando allí una marca permanente, que es capaz de reproducirlos después. Análogamente, en el método Lippmann las vibraciones luminosas hacen sus moldes en la capa sensible, dejando allí un depósito fotográfico permanente, capaz de reproducir más tarde las vibraciones luminosas.

grueso, ó sea el de una hoja de papel ordinario. En efecto, como aproximadamente se tiene

para el rojo. . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{3300}$ de mm.

para el amarillo. . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{4000}$ —

para de violado. . . . . $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{5000}$ —

el rojo del espectro será producido por 330 láminas delgadas superpuestas, el amarillo por 400 y el violado por 500.

527. **Demostración experimental de la teoría.** — *Últimos resultados.* — Resulta inmediatamente de esta teoría de Lippmann que los *colores compuestos* de los objetos coloreados deben *darse* en fotografía, tan bien como los simples del espectro, si se emplea el método explicado. Así lo ha probado la experiencia. Lippmann ha obtenido pruebas perfectamente claras de objetos de colores complejos : un ramo de amapolas encarnadas rodeadas de naranjas amarillas, un guacamayo (disecado, por supuesto, toda vez que la exposición es aún demasiado larga para que sea posible fotografiar un ave viva). una rama de acebo con sus hojas verdes y sus bayas rojas y un fragmento de vidriera de cuatro tonos (encarnado, verde, amarillo y azul). Por fin, en los últimos meses Lippmann y Lumière han sacado vistas de paisajes de admirable verdad. Estos paisajes se han obtenido mediante exposición al sol que ha variado de media hora á tres cuartos de hora.

LIBRO VIII

CALOR

—

CAPITULO PRIMERO

EFECTOS GENERALES. — TERMOMETRÍA.

528. **Definición y origen del calor. — Hipótesis de las ondulaciones.** — El *calor* es ante todo la causa de nuestras sensaciones de *calor* y de *frío;* pero esta causa produce efectos más variados y potentes, que permiten definirla así: es la que hace fundirse los cuerpos sólidos y hervir los líquidos, dilatarse todas las sustancias y la que pone incandescentes á los metales y algunos cuerpos más.

Se han emitido muchas hipótesis sobre el origen del calor; pero los sistemas principales sostenidos por los físicos son dos — los mismos que para la luz : el de la *emisión* y el de las *ondulaciones.*

En el primero se atribuían los fenómenos caloríficos á un fluido material, imponderable, incoercible, llamado *calórico.* Como estos átomos se encuentran, según la teoría, en estado constante de repulsión, son proyectados en todas direcciones y á todas las distancias, almacenándose en cantidad variable dentro de los cuerpos y oponiéndose al contacto inmediato de sus moléculas. La hipótesis de la materialidad del calor fué adoptada por los sabios más ilustres, como Newton, Lavoisier, Laplace y Gay-Lussac.

Hoy la han abandonado todos los físicos, para adoptar la de las *ondulaciones,* según la cual, las últimas moléculas de los cuerpos están animadas de movimiento vibratorio de escasísima amplitud, pero muy rápido, *de donde resulta el calor;* este movimiento es transmitido á distancia gracias á un medio infinitamente elástico, el *éter,* aquel mismo cuya existencia ha sido demostrada por los fenómenos luminosos.

El calor y la luz se deben, según esta hipótesis, á una sola y misma causa : las vibraciones de las moléculas de los cuerpos transmitidas por el éter. Entre las vibraciones que producen el calor y las que dan la luz no hay sino una diferencia de velocidad: esta es la misma diferencia que existe en Acústica entre las vibraciones que dan los sonidos graves y las que producen los sonidos agudos [1].

529. **Efectos generales : dilatación.** — Todos los cuerpos se dilatan por efecto del calor : los que lo hacen en mayor grado son los gases, después vienen los líquidos y por fin los sólidos.

1. Aunque se admite la inmaterialidad del calor, se ha conservado el lenguaje usado en la teoría de la emisión y aun se dice que un cuerpo al calentarse *gana calor* y que al enfriarse lo *pierde;* pero en realidad debe entenderse por esto que sus moléculas *ganan* ó *pierden* fuerza viva.

1°. *Dilatación de los sólidos.* — La dilatación de los sólidos es tan escasa que no es posible ponerla de manifiesto más que recurriendo á aparatos particulares.

Experiencia del pirómetro de cuadrante. — Tómase por ejemplo un vástago metálico A (fig. 537), que se fija por uno de sus extremos con un tornillo de presión B, mientras se deja al otro libre y en contacto con el brazo menor de una palanca K, móvil sobre un cua-

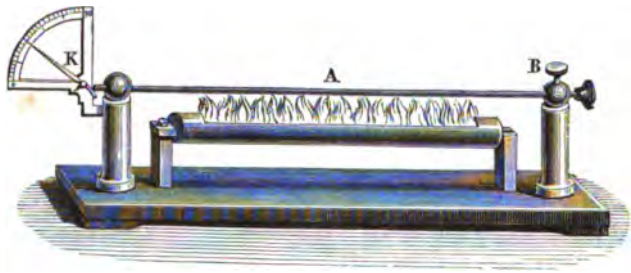


Fig. 537.

drante. Debajo del vástago hay un depósito donde se quema alcohol. La aguja K está al principio en el cero del cuadrante; pero á medida que el vástago A se calienta, va subiendo, por efecto de la dilatación lineal.

Anillo de S' Gravesande. — Se da este nombre á un pequeño anillo metálico *m* (fig. 538) por el cual pasa libremente á la temperatura ordinaria una bola de cobre *a* del mismo diámetro. Cuando se calienta esta bola independientemente sobre la llama de una lámpara de alcohol, ya no puede pasar á través del anillo que sigue frío: esto prueba el aumento de volumen de la bola. Pero si se calientan anillo y bola al mismo tiempo, el paso puede efectuarse libremente : lo cual prueba primeramente que un sólido hueco se dilata y además, que se dilata de la misma manera que un sólido macizo de la misma naturaleza y volumen.

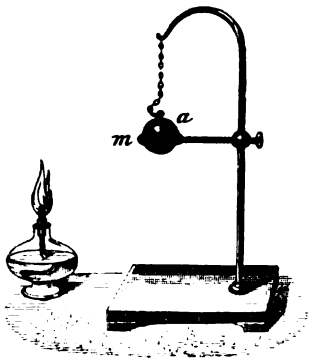


Fig. 538.

2°. *Dilatación de los líquidos.* — Se llena con un líquido coloreado un pequeño matraz de vidrio al cual se suelda un tubo capilar (fig. 539): así que se calienta, el líquido sube en el tubo, por ejemplo de *a* hasta *b*. Obsérvase que esta dilatación es siempre mucho mayor que en los sólidos.

3° *Dilatación de los gases.* — El mismo aparato sirve para probar la dilatación de los gases. Con tal fin se llena el matraz de aire y se introduce en el tubo un índice de mercurio de 1 á 2 centímetros de largo (fig. 540). Cuando se calienta el matraz, aunque sólo sea acercando la mano, el índice es impulsado hacia la extremidad del tubo y acaba por ser arrojado de él; de donde se deduce que los gases son muy dilatables aun para escasa elevación de temperatura.

4°. *Variación de la fuerza elástica de los gases.* — Si se calienta un gas impidiéndole dilatarse, se aumenta su fuerza elástica. El efecto del calor consiste entonces en un aumento de fuerza elástica del gas calentado. Sería fácil medirlo poniendo en comunicación la extremidad del cuello del matraz con una de las ramas de un pequeño manómetro de agua.

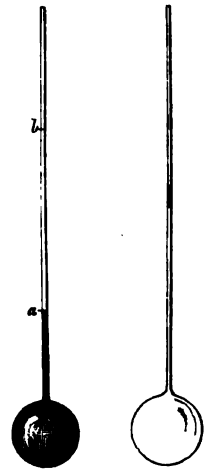


Fig. 539. Fig. 540.

5°. *Contracción por el enfriamiento.* — En estas diversas experiencias, apenas se enfrían los cuerpos, se contraen y así que su estado calorífico ha vuelto á ser el mismo que antes, recobran exactamente, sea su volumen primitivo, sea su fuerza elástica inicial.

530. **Efectos generales : cambios de estado.** — 1°. *Fusión.* — La dilatación de los cuerpos sólidos alcanza un límite cuando se les calienta gradualmente. Llega un momento en que el cuerpo sólido se convierte en teatro de un nuevo fenómeno físico: la fusión, esto es, *el paso del estado sólido al líquido.*

Sin embargo, gran número de sustancias compuestas, como el papel, la madera, la lana, ciertas sales, no se funden por la acción de un foco calorífico aunque sea intenso: pero son descompuestas. Sólo un cuerpo simple no ha podido ser fundido realmente hasta hoy, el carbono.

Cuando se enfrían los cuerpos sólidos liquidados, vuelven á su estado primitivo : este es el cambio inverso á la fusión, la *solidificación.*

2°. *Vaporización y vapores.* — La acción prolongada del calor sobre la materia tiene también por efecto hacerla pasar del estado líquido al de fluido aeriforme. Este fenómeno se designa por el nombre general de *vaporización*, y se llama *vapores* á los fluidos aeriformes que resultan de este cambio de estado.

Observación. — El carácter general de los cambios de estado físico es que todo cuerpo *que está mudando de estado* constituye un medio *cuya situación calorífica es constante.* Así, el hielo fundente y el agua hirviendo — bajo una presión determinada — constituyen dos medios cuyo *estado calorífico es constante.*

NOCIONES ELEMENTALES DE TERMOMETRÍA.

531. **Temperatura : definiciones.** — El estado calorífico actual de un cuerpo se manifiesta á todos nosotros primeramente por las sensaciones de calor ó de frío que nos procura. Según que estas sensaciones producidas por dos cuerpos A y B, son idénticas ó diferentes, se dice que estos dos cuerpos tienen *la misma temperatura* ó *temperaturas diferentes.*

Un cuerpo que es teatro de un cambio de estado físico, — fusión, solidificación ó ebullición, — posee, según hemos dicho, un estado calorífico permanente. Dícese que es un medio *de temperatura constante.*

Si los dos cuerpos A y B son puestos ambos en contacto duradero con un medio C de temperatura constante, acaban por adquirir los dos este mismo grado de calor. Entonces se dice que están en *equilibrio de temperatura.* Ya en esa situación no pueden actuar uno sobre otro desde el punto de vista calorífico : ya no cabe entre ellos cambio ninguno de calor. La *temperatura* puede ser considerada en consecuencia como el factor que determina los cambios de calor entre los cuerpos.

Termometría. — Como la imperfección de nuestros sentidos no nos permite medir la temperatura de los cuerpos por las sensaciones que excitan en nosotros, ha habido que recurrir á los efectos físicos que acompañan las variaciones de temperatura. Se han adoptado al efecto las dilataciones y contracciones, por ser las más sencillas de observar y las más fáciles de medir de modo exacto.

El conjunto de los métodos empleados para medir las temperaturas constituye la *termometría.*

Termómetros. — Se llama *termómetros* á los instrumentos que sirven para medir las temperaturas[1], y *termoscopios* á los aparatos que sólo sirven para indicar las variaciones de las mismas.

522. **Elección de las sustancias termométricas.** — Como los sólidos son muy poco dilatables, los cuerpos utilizados ordinariamente en termometría son los líquidos. Sin embargo, los físicos utilizan también la dilatación de los gases en la *termometría de precisión* (576).

El mercurio es el líquido termométrico por excelencia : primero por ser el que con mayor regularidad se dilata, y después porque sólo entra en ebullición á temperatura muy elevada ; finalmente, porque se pone más de prisa que los demás líquidos en equilibrio de temperatura con los cuerpos ambientes. Debe esta última facultad á ser un metal y á que, por tanto : 1°. es mejor conductor del calor que todos los líquidos, y 2°. exige menos calor para elevar su temperatura. Se ha utilizado también mucho el alcohol para medir las

1. El invento de los termómetros data de fines del siglo XVI. Unos lo atribuyen a Galileo, otros á Drebbel, médico holandés, y algunos a Sanctorio médico veneciano. *Termómetro* se deriva de θερμός, calor, y μέτρον, medida ; *termoscopio* procede de σκοπεῖν, examinar.

bajas temperaturas, porque este líquido no se congela por la acción de los mayores fríos *naturales* conocidos [1]. Hoy se tiende á reemplazarlo por el tolueno.

533. **Termómetro de mercurio.** — 1°. *Descripción.* — El termómetro de mercurio es el más usado. Compónese de un tubo capilar ó vástago de cristal ó mejor dicho de *vidrio duro*, soldado á un depósito cilíndrico ó esférico de la misma sustancia. El depósito y parte del tubo están llenos de mercurio y una escala marcada, sea en el tubo mismo, sea en una regla de cobre que le es paralela, indica por la dilatación del líquido las variaciones de temperatura : esto es lo que se denomina *escala termométrica.*

2°. *Construcción.* — La construcción de un termómetro comprende varias operaciones delicadas [2].

Elección del vástago. — No todos los tubos que salen de la fábrica son á propósito para construir termómetros. El primer cuidado del obrero debe ser rechazar los malos y servirse sólo de los útiles. Los buenos vástagos son aquellos en que un índice de mercurio que recorre toda su longitud interiormente presenta altura que se puede considerar constante.

División del tubo. — Cuando el tubo debe servir para un instrumento de precisión, importa que esté graduado en partes de igual capacidad. Para ello, cuando las variaciones del índice del mercurio son poco aparentes, se pega á lo largo del tubo una banda de papel, y se marca un trazo con el lápiz frente á los puntos ocupados sucesivamente por las extremidades de la columna.

Las divisiones formadas de esta manera indican necesariamente capacidades iguales, toda vez que corresponden á un mismo volumen de mercurio. Como los intervalos de estas divisiones están bastante cerca unos de otros para que se pueda considerar constante en cada una de ellas el diámetro del tubo, se pasa luego á divisiones más pequeñas, fraccionando á las primeras en cierto número de partes iguales. Esta última operación se efectúa con la máquina de dividir.

Depósito. — Entonces el obrero suelda una ampolla C (fig. 541) á la extremidad superior del vastago y un depósito abajo. La costumbre le permite dar de antemano á ese depósito dimensiones apropiadas á la cantidad de mercurio que debe contener. Por lo demás, se persuade de ello llenando el depósito de mercurio *grosso modo* hasta que suba un poco en el vástago, y marcando inmediatamente dos puntos que le den aproximadamente la longitud del grado. Si esta longitud corresponde á la que le está impuesta por el camino que ha de recorrer el mercurio en el vástago, el depósito tiene las dimensiones convenientes. Si es demasiado grande ó muy pequeño, el obrero lo

1. Más adelante veremos que el alcohol ha sido congelado por Wroblewski, valiéndose de frios *artificiales.*

2. Los pormenores relativos á la construcción ordinaria de los termómetros nos han sido facilitados por M. Victor Chabaud, jefe de la casa Alvergniat.

modifica ó sopla otro, hasta obtener lo que desea. Entonces retira el mercurio que ha servido para el ensayo y después cierra el depósito dejándolo tal como habrá de servir una vez terminado el instrumento.

Fig. 541.

Manera de llenar el termómetro. — Introdúcese en la ampolla superior cierta cantidad de mercurio puro y seco, mayor que la realmente necesaria; después, inclinando un poco el tubo, se calienta el depósito con una lámpara de alcohol, ó bien con carbones incandescentes en unas parrilllas inclinadas (fig. 162). El aire dilatado sale en parte por el embudo C. Si entonces se deja enfriar el tubo aunque manteniéndolo en posición vertical, el aire que dentro queda se contrae y la presión atmosférica obliga al mercurio á pasar al depósito D, por capilar que el tubo sea. Reitérase la operación hasta que sólo quede en el depósito D escaso volumen de aire. Haciendo hervir entonces el mercurio, se expulsa por medio de los vapores mercuriales cuanto quedaba de aire y de humedad en el tubo y en el depósito.

Una vez aquí se desprende la ampolla superior, dejando en la extremidad correspondiente una punta bien afilada. Luego se calienta el depósito hasta que el líquido dilatado llegue á lo alto del tubo.

Cuando se ha expulsado todo el exceso de mercurio que se introdujo en el instrumento, se rompe á su vez la punta, mientras está llena de mercurio, de modo que no quede rastro de aire en el vértice. El termómetro queda terminado. Sólo falta soldar en la parte superior un anillo para colgarlo, ó que redondear ese extremo, formando allí una pequeña cámara si se considera conveniente (fig. 546).

534. **Graduación del termómetro : puntos fijos de la escala.** — *Graduar* el termómetro es dotar al vástago de una *escala de las temperaturas*. Con tal fin se empieza por marcar en él dos puntos fijos, que corresponden á dos temperaturas *fáciles de obtener* y *siempre idénticas á sí mismas*.

Ya hemos dicho que el hielo fundente y el agua hirviendo bajo presión determinada, constituyen dos medios de temperatura constante. Se ha convenido en adoptar como *primer punto fijo* la temperatura del hielo fundente, haciendo de ella el *cero* de la escala de las temperaturas; y como *segundo punto fijo* la temperatura á que el agua destilada, calentada en un vaso metálico, entra en ebullición

bajo la presión normal de 76 cm : de ésta se hace *el grado* 100. De manera que la graduación del termómetro comprende tres operaciones : la determinación del cero, la del punto 100 y el trazado de la escala.

I. *Determinación del cero.* — 1°. *Termómetros ordinarios.* — Antes se contentaban con introducir el depósito del termómetro en un vaso de hielo fundente, cuyo fondo tenía un agujero para dejar salir el agua procedente de la fusión (fig. 542). Este aparato puede servir para aparatos ordinarios ó para la comprobación rápida del punto cero.

Fig. 542.

Fig. 543.

2°. *Termómetro de precisión.* — La oficina internacional de Sevres ha puesto en uso otro medio para los termómetros de precisión. Una campana A de vidrio, de algunos litros de cabida, y provista de una llave para dejar salir el agua en su parte inferior (fig. 543), es mantenida verticalmente por un soporte ; éste lleva, además, dos vástagos B, B con cortaduras guarnecidas de corcho, donde el termómetro es suavemente sostenido por un muelle C.

Se *desmenuza finamente* el hielo y se le echa en la campana, añadiendo luego agua destilada, después de lo cual se la comprime fuertemente con un pedazo de madera ; entonces se abre la llave para dejar salir el agua excedente, que se hace subir á la superficie apretando un poco el hielo ; así que la superficie mencionada empieza á secarse, se cierra otra vez la llave. La masa de hielo debe quedar impregnada de agua. Las determinaciones en el hielo seco podrían ser falsas, ya porque el contacto con el termómetro resulte imperfecto, ya porque la temperatura del termómetro es inferior á 0°: el error es positivo ó negativo según los casos. Preparado de esta manera el hielo, se practica en él un agujero con un vástago de vidrio apoyado contra las varillas B ; el agujero no se debe prolongar hasta el fondo de la campana.

Observación. — Esta operación debe ser empezada de nuevo cada vez que el instrumento se usa para medidas de precisión ; pues un termómetro que ha sido calentado conserva después del enfriamiento, un *residuo* de dilatación, de donde resulta el *cambio de lugar del cero*, fenómeno tanto más acentuado cuanto más alta es la temperatura á que el termómetro se ha visto sometido

II. *Determinación del punto* 100. — 1°. *Termómetros ordinarios.* — El segundo punto fijo se determina por medio del aparato de Regnault (fig. 544, sección vertical).

El aparato es enteramente de cobre rojo. Un gran tubo central A, abierto en sus dos extremidades (fig. 544), está dispuesto sobre un vaso cilíndrico M, que contiene agua; una especie de mango B, concéntrico al tubo A, y que lo rodea enteramente, está fijo sobre el mismo vaso M. Esta segunda envoltura, cerrada en sus dos extremos, está provista de tres conductos *a*, E, D : por *a* pasa á través de un tapón el vástago *t* del termómetro cuyo punto 100 se trata de averiguar; en E se halla adaptado un manómetro truncado de vidrio, destinado á comparar con la presión exterior la tensión del vapor interior; por fin el tercer conducto D permite la salida del vapor á la atmósfera, después que circula en torno del termómetro. La segunda envoltura B impide el enfriamiento del tubo central preservándolo de todo contacto con el aire. En el punto *a*, donde el nivel del mercurio se para, debe marcarse un trazo, que es el punto 100 buscado.

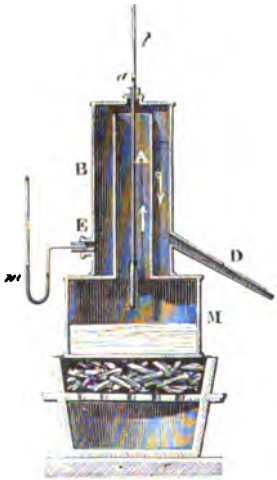


Fig. 544.

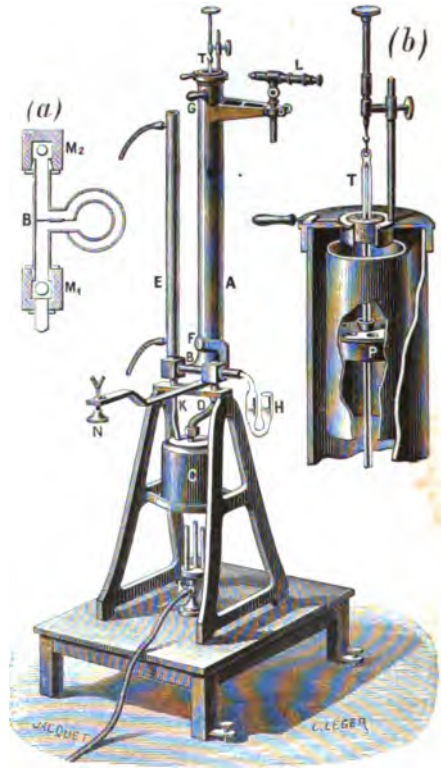


Fig. 545.

2°. *Termómetros de precisión.* — En la oficina de Sevres se usa otro aparato y un método perfeccionado. El termómetro T (fig. 545) es introducido en un grueso

tubo de doble circulación A; dicho termómetro atraviesa frotando con él un tapón de corcho mantenido en un cartucho metálico, y que cierra exactamente el orificio superior (fig. 545, *b*); este cartucho, independiente de la tapadera, es mantenido en su sitio por un pequeño vástago de latón. Para mayor seguridad, se suspende el termómetro por un hilo de un vástago metálico que se puede fijar á una altura conveniente; además, es guiado por dos piezas P, taladradas de agujeros, que atraviesa por un pequeño embudo central, entrando con frotamiento en lo interior del tubo.

El tubo A está sostenido por otro horizontal B que forma eje, y que penetra en los engarces M_1 y M_2 (fig. 545, *a*); puede colocársele horizontal ó verticalmente: de esta manera es fácil calcular la influencia de los pesos de la columna de mercurio sobre el lugar del grado 100. Su posición está determinada por dos topes N, con tornillo de arreglo; una llave de seguridad F lo mantiene en su posición vertical; un mango de madera sirve para manejarlo. Por la parte del soporte M_1, el tubo B está en comunicación con el tubo interior, donde se encuentra colocado el termómetro; por la parte de M_2, está enlazado solamente con el mango exterior

El vapor desarrollado en la caldera de cobre C llega á M_1 por un tubo de plomo D rodeado de fieltro, y después penetra en lo interior del tubo A, que recorre en toda su longitud, pasa por entre las paredes, y sale por M_3. Condénsase en un tubo vertical E, abierto por arriba y envuelto en una circulación de agua fría; el agua condensada vuelve al fondo de la caldera por el tubo K. Un manómetro de agua H indica la diferencia de las presiones interior y exterior, ó de otro módo, la presión en el aparato. Las lecturas se efectúan con un pequeño anteojo L fijo en el tubo A. La columna mercurial no debe subir por encima del tapón más que la cantidad estrictamente necesaria para hacer posible la observación. La diferencia de nivel en las dos ramas del manómetro indica el exceso de presión del vapor á la salida de la caldera. Se tendrá la presión total en el aparato añadiendo á la presión, medida en el barómetro, la mitad del exceso, siempre muy pequeño, indicado por el manómetro.

El termómetro debe permanecer expuesto á la temperatura de 100° todo el tiempo que el cambio de lugar del cero es sensible, quiere decir desde unos cuantos minutos á una hora próximamente, según la naturaleza de la envoltura.

3°. *Corrección relativa á la presión exterior.*— No se puede marcar 100° en el punto donde se detiene el mercurio sino en tanto cuanto la presión total en el aparato es igual á 76 cm. Según que es inferior ó superior á ese número, la temperatura de ebullición del agua corresponde á una temperatura inferior ó superior á 100°.

Puede calculársela con arreglo á la fórmula siguiente, usada por la Oficina de Sevres:

$$T - 100^\circ = \frac{H - 760}{27{,}25}.$$

Ésta da una elevación de 1° para un aumento de 27,25 mm.

III. *Construcción de la escala.* — Una vez obtenidos los dos puntos fijos, si el instrumento es ordinario, el grabador dividirá el intervalo de 0° á 100° en 100 partes iguales y apuntará números de 10 en 10: luego grabará las divisiones y los números con ácido fluorhídrico. El conjunto de estas divisiones constituye la *escala termométrica.*

Para los instrumentos de precisión se usan divisiones de igual capacidad que han sido marcadas previamente. Cuéntanse en la máquina de dividir el número de estas divisiones comprendidas entre los dos puntos fijos y, dividiendo este número por 100, se tiene el número de divisiones y fracciones de división que equivale á un grado; de ahí se deduce después, á partir del cero, la posición de cada grado (fig. 546).

Observación. — Las divisiones del termómetro se llaman *grados*, y se indican por medio de un pequeño cero colocado á la derecha del

número que expresa la temperatura, y algo más arriba. Para distinguir las temperaturas inferiores á cero de las superiores, se las hace preceder del signo menos (—): 15 grados bajo cero se escriben así: — 15°.

535. **Diferentes escalas termométricas.** — Distínguense tres principales: la *escala centígrada*, la *escala de Réaumur* y la *escala de Fahrenheit*.

1°. *Escala centígrada.* — La escala centígrada es la que acabamos de construir; casi todos los países la emplean. Fué imaginada por el físico sueco Celsio. De modo que el *grado centígrado* debe definirse de este modo: la *centésima parte* de la dilatación aparente que sufre el mercurio en el termómetro, entre la temperatura del hielo fundente y la del agua hirviendo bajo la presión de 76 cm.

2°. *Escala Réaumur.* — El físico francés Réaumur propuso en 1731 los mismos puntos fijos, pero dividió su intervalo en 80°.

De modo que 80° Réaumur equivalen á 100° centígrados: de ahí resulta que 1° R equivale á $\frac{5}{4}$ de grado C.

3°. *Escala Fahrenheit.* — Fahrenheit propuso en 1714 una escala cuyo uso se ha extendido después por Holanda, Inglaterra y América del Norte. El punto fijo superior de esta escala corresponde también á la temperatura del agua hirviendo; mas el cero está en el punto donde se para el termómetro cuando se mezclan pesos iguales de sal amoniaco machacada y de nieve: el intervalo de los dos puntos fijos se divide en 212°.

El termómetro F marca en el hielo fundente 32°; por consiguiente, 100° C equivalen á 180° F y 1° C equivale á $\frac{9}{5}$ del grado F.

Fig. 546.

4°. *Conversión de las escalas.* — Supongamos por ejemplo que se trate de convertir en grados C una temperatura calculada ya en grados F, digamos 95° F. Hay qne empezar por restar 32 del número dado á fin de comparar las dos escalas partiendo del mismo punto: el resto es aquí 63; ahora bien, como 1° F vale $\frac{5}{9}$ de grado C, 63° F igualan á $\frac{5}{9} \times 63$ ó 35° C: luego un termómetro C marcaría 35° en el mismo lugar donde el termómetro F marca 95°.

Representando por t_f y por t_c estas dos temperaturas, se tiene la fórmula general

$$[1] \qquad t_c = (t_f - 32)\,\frac{5}{9},$$

que indica los cálculos necesarios para efectuar la conversión. De esta igualdad resulta

$$[2] \qquad t_f = t_c \times \frac{9}{5} + 32,$$

fórmula que sirve para convertir los grados C en grados F.

536. **Cambio de posición del cero.** — Hemos visto que los termómetros están sometidos á una causa de error que hemos tenido en cuenta : el cero tiende á bajar, quiere decir que estando el termómetro en hielo fundente después que se le ha calentado, el mercurio se para siempre por debajo del cero primitivo.

Obsérvase, además, una *elevación del cero*, que procede de la desaparición progresiva del *residuo* de dilatación inicial. Este trabajo molecular es lento; pues según las experiencias de Despretz, el cero puede estar subiendo durante varios años.

Así es que en las medidas de precisión no se deben usar sino termómetros de escalas variables, cuyos puntos fijos se determinan en cada operación.

Comparación del vidrio duro y del cristal. — Los termómetros de *vidrio duro*, tales como se les construye actualmente, están sujetos á este fenómeno, lo mismo que los antiguos de cristal, y en ellos el cambio del cero aumenta también con el grado de recalentamiento que han experimentado. Pero si se compara la curva de movimiento del vidrio duro con la del cristal, se ve que ésta es irregular, mientras que es muy regular la otra. Además, la marcha es muy diferente. El cambio de posición es bruscamente considerable, y después disminuye la variación para una misma elevación de temperatura, acabando por hacerse casi nula. Por consiguiente, si se toma un termómetro de vidrio duro, y se le calienta á temperaturas elevadas antes de graduarlo, se puede esperar que así se obstendrá un instrumento en que el cambio de lugar del cero sea despreciable.

537. **Condiciones de sensibilidad.** — *Termómetros de escalas fraccionadas.* — La sensibilidad de un termómetro puede considerarse desde dos puntos de vista. En efecto, un termómetro es *sensible :* 1°. cuando acusa pequeñísimas variaciones de temperatura; 2°. cuando se pone rápidamente en equilibrio de temperatura con los cuerpos ambientes.

Obtiénese el primer género de sensibilidad dando al termómetro un vástago muy capilar, soldado á un depósito algo grueso. La marcha del mercurio en el tubo queda entonces limitada á pequeño número de grados, por ejemplo de 10 á 20, ó de 20 á 30, y cada grado ocupa longitud considerable en el vástago, lo que proporciona medio de calcular fracciones de grado muy pequeñas. Con diez termómetros de esta clase, cada uno de los cuales comprenda 10 grados de 0° á 10°, de 10° á 20°, de 20° á 30°, etc., se podrá medir con mucha precisión toda temperatura comprendida entre 0° y 100°. Esto es lo que se llama una serie de *termómetros de escalas fraccionadas.*

El segundo grado de sensibilidad se realiza dando al mercurio un depósito muy pequeño; pues mientras menor es la masa de metal, más rápidamente se pone á nivel de temperatura con el medio ambiante donde está.

538. **Termómetro de alcohol.** — El *termómetro de alcohol* contiene en vez de mercurio alcohol teñido de rojo con orchilla. Es fácil llenarlo porque este líquido hierve á la temperatura poco elevada de 79°.

Construcción. — Después de calentar ligeramente el depósito, para hacer salir un poco de aire, se introduce la extremidad abierta del vástago en el alcohol teñido de encarnado; el enfriamiento hace que

el aire que queda en el depósito se contraiga, y la presión atmosférica hace subir por él una pequeña cantidad de alcohol (fig. 547). Entonces se calienta hasta ebullición : los vapores de alcohol que se desprenden arrastran todo el aire que se encuentra en el depósito y en el vástago. Después basta, al cabo de algunos instantes de ebullición, con volver bruscamente el termómetro é introducir de nuevo su extremidad en el alcohol. Condénsanse los vapores, hácese dentro el vacío y, por efecto de la presión atmosférica, el depósito y el vástago se llenan completamente [1]. Caliéntase suavemente hasta hacer salir la mitad ó los dos tercios del líquido contenido en el vástago, y después se cierra su extremidad con la lámpara, pero cuidando de dejar aire dentro. Éste tiene por misión retardar, gracias á su fuerza elástica, el punto de ebullición del alcohol, é impedir, cuando se inclina el tubo, que la columna líquida se divida en varios trozos.

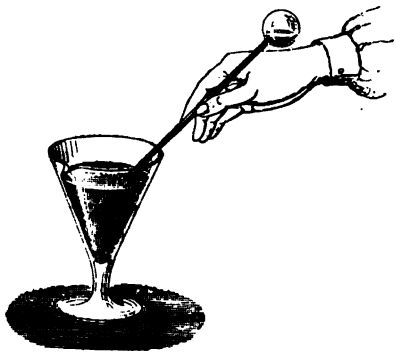


Fig. 547.

Graduación. — Se toma el cero en el hielo fundente, como para el termómetro de mercurio; después se efectúa la graduación por comparación con un termómetro tipo de mercurio, y tomando únicamente como límite superior de la escala 60° ó 70°.

539. **Termómetros de líquidos incongelables.** — El alcohol, que no es incongelable pues lo ha solidificado Wroblewski, tiene además el inconveniente de volverse jarabiento á las temperaturas muy bajas; por fin, como los alcoholes no tienen todos el mismo grado de hidratación, se ha visto que diversos termómetros de alcohol, sometidos al mismo enfriamiento, han diferido entre sí varios grados.

Para remediar estos inconvenientes se ha propuesto sustituir el alcohol por varios líquidos también incongelables y que presentan la ventaja de ser completamente anhidros y de conservar siempre la misma fluidez, por ejemplo el sulfuro de carbono, el éter sulfúrico y el cloruro de etilo.

Termómetros de tolueno. — M. Victor Chabaud ha propuesto recientemente el *tolueno*, cuya fluidez es muy grande, aun á las temperaturas más bajas. Como sólo

1. Por efecto de la elevación de temperatura del alcohol que penetra en el depósito, el aire que allí estaba disuelto se desprende, y en el depósito puede alojarse una pequeña burbuja gaseosa. Para expulsarla se ata la extremidad del vástago á una pequeña cuerda y se hace girar rápidamente el instrumento como una honda. La fuerza centrífuga hace que el alcohol, que tiene mayor masa, es impulsado hacia la bola y el aire sale al exterior.

hierve por encima de 100°, permite determinar directamente el intervalo fundamental 0-100.

Además, como la concentración del tolueno ha sido perfectamente estudiada hasta — 70° en la Oficina internacional de Sèvres, es posible, fundándose en estas medidas, construir un termómetro de tolueno cuyas indicaciones sean enteramente comparables con las que daría un termómetro de mercurio.

En cambio, la construcción de un termómetro de tolueno es más difícil que la de uno de alcohol, pues hay que adoptar grandes precauciones para evitar todo contacto del aire con el líquido, mientras se llena y se gradúa el instrumento.

540. **Termómetro metálico de Breguet.** — Entre los termómetros ordinarios (ó termoscopios) se puede citar uno enteramente metálico construído por Abrahán Breguet, y que es notable por su gran sensibilidad.

El principio de este instrumento es la *desigual dilatabilidad de los metales.* Está formado de tres láminas superpuestas, de platino, oro y plata, soldadas juntas en toda su longitud y pasadas después por el laminador, de manera que sólo formen una cinta metálica muy delgada. Esta cinta se arrolla en forma de espiral, y después se fija su extremidad superior en un montante, colgando de la otra una ligera aguja de cobre, que puede moverse libremente sobre un cuadrante horizontal en que se graba una escala centígrada (fig. 548).

Fig. 548.

La plata, que es el más dilatable de los tres metales, forma la cara interior de la hélice; el platino que es el menos dilatable, la exterior; y el oro entre los dos. Cuando se eleva la temperatura, la plata se dilata más que el platino y que el oro; la hélice se desarrolla: cuando la temperatura baja el efecto es opuesto. Este termómetro se gradúa por comparación con uno tipo de mercurio.

Observaciones. — 1°. Si no se usaran más que la plata y el platino, la gran diferencia de sus dilataciones podría ocasionar la ruptura de la hélice. Pero la lámina de oro impide este accidente, por causa de su dilatación intermedia.

2°. Un vástago metálico *a*, representado á la izquierda de la figura, sirve de eje á la hélice, para mantenerla é impedir que se deforme al transportar el instrumento.

541. **Termómetros de máxima y de mínima.** — En las observaciones meteorológicas se necesita conocer la temperatura más alta del día y la más baja de la noche. Con termómetros ordinarios no sería posible conocer fácilmente estas temperaturas. Así es que se han imaginado con tal fin aparatos especiales llamados *termómetros de máxima* y *de mínima.*

542. **Termómetros de Rutherford.** — Los más sencillos son los de Rutherford. Colócanse sobre una misma placa dos termómetros de vástagos encorvados horizontalmente. En el primero, que es de mercurio, se introduce un pequeño índice cilíndrico de hierro A (fig. 549), que puede deslizarse libremente en el tubo. Este índice se encuentra al empezar la observación en contacto de la columna

de mercurio, y como el instrumento ocupa una posición horizontal, permanece allí. Pero cuando el mercurio sube, porque se dilata al

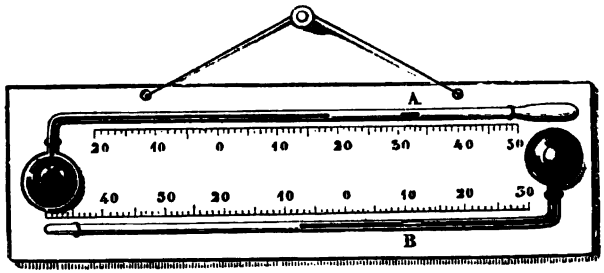


Fig. 549.

elevarse la temperatura, el índice es impulsado hacia delante; mas cuando el mercurio se contrae, el índice no lo sigue en su movimiento y permanece en el sitio á donde llegó, porque entre el líquido y el hierro no hay adherencia. De manera que el punto donde se para el índice indica la temperatura más alta obtenida durante el período de observación.

En el *termómetro de mínima*, el líquido es alcohol en que está sumergido por completo un pequeño cilindro de esmalte B destinado á servir de índice (fig. 549). Si la temperatura baja mientras que el cilindro se encuentra en la extremidad de la columna líquida, ésta, que moja el esmalte y se adhiere á él ligeramente, lo arrastra consigo al contraerse: así llega el índice hasta el punto donde ocurre el máximum de contracción del líquido. Al subir la temperatura, el alcohol se dilata y pasa por entre la pared del tubo y del índice, sin que éste se mueva. Por consiguiente, la extremidad del índice *más distante del depósito* indica la temperatura más baja á que ha llegado el instrumento.

Fig. 550.

543. **Termómetro de máxima de Walderfin ó termómetro de derrame.** — Este termómetro, llamado de *derrame*, se funda en un principio completamente opuesto. Tiene la forma de un termómetro de mercurio ordinario, que está provisto, en la parte superior, de un pequeño depósito ó *panza* donde penetra el vástago, terminando en una punta afilada y abierta (fig. 550).

Preparación del instrumento. — En esta panza hay mercurio, que sirve para *cargar* el instrumento, quiere decir, para llenar enteramente el vástago antes de cada observación. Con tal fin se calienta el depósito inferior hasta que el mercurio al dilatarse empiece á salir por la punta afilada. Entonces se vuelca el tubo: el mercurio que está en la panza baja hacia la punta y ésta penetra en el líquido enteramente; después se deja enfriarse poco á poco el termómetro, manteniéndolo siempre invertido. Por el enfriamiento se contrae el mercurio del depósito y pasa cierta cantidad de la panza al vástago, hasta que éste se encuentre del todo lleno.

Manera de usarlo. — Para servirse de este instrumento, empiézase por cargarlo á una temperatura inferior á la que se trata de observar y después se le coloca en el medio cuya temperatura máxima se desea conocer. Si empieza por enfriarse, no hay inconveniente ninguno, toda vez que no entra ni sale mercurio. Pero si la temperatura sube, el mercurio se dilata, y una parte se derrama en la panza sin poder volver al termómetro, porque éste se encuentra entonces en la posición que indica la figura 550.

Una vez establecido el equilibrio, se determina la temperatura máxima por una operación subsiguiente. Basta comparar el instrumento con un termómetro tipo, calentándolo al lado de éste en un mismo baño, hasta que el mercurio suba al vértice del vástago y esté en disposición de salir.

544. **Termómetro de máxima y de mínima de Miller-Casella.** — Miller-Casella cons-

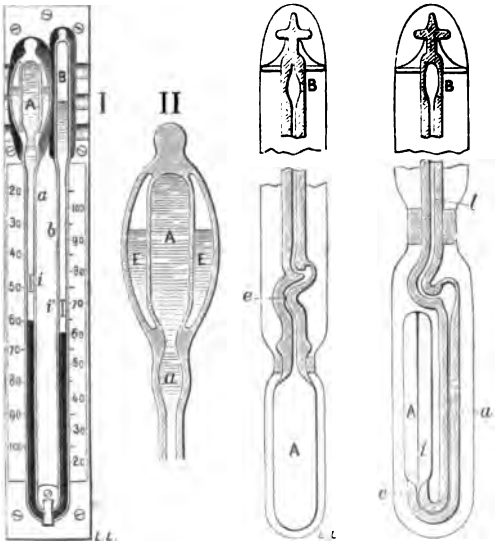


Fig. 551. Fig. 552. Fig. 553.

truyó, con arreglo á principio análogo al precedente, un termómetro que puede indicar por sí solo las máximas y las mínimas.

Compónese de un tubo de vidrio *ab* encorvado á manera de U (fig. 551, I y II), y terminado en sus extremos por dos depósitos yuxtapuestos, A y B. El fondo del tubo contiene en las dos ramas mercurio sobre el cual flota una mezcla de alcohol, agua y creosota. El depósito A está lleno de ella completamente, mientras que en B queda una pequeña masa de aire confinada sobre el líquido. Dos índices de acero, *i* é *i'* pueden ser impulsados por los niveles mercuriales cuando adelantan; pero permanecen en su sitio al retroceder los meniscos, gracias á un hilo de vidrio que los rodea y que forma muelle. Si la temperatura se eleva, el líquido del depósito A se dilata é impulsa al mercurio y en consecuencia al índice *i'* en la rama *b*. Lo contrario ocurre cuando la temperatura baja: el índice *i* es impulsado por el mercurio que se adelanta hasta A. Una escala indica en la rama *b* las máximas, y otra en *a* las mínimas.

Observación. — Este termómetro se utilizó durante mucho tiempo para averiguar la temperatura del fondo de los mares. En este caso se envuelve el depósito A en una segunda cubierta protectora EE (fig. 551, II), separada de la primera por un pequeño espacio lleno en sus tres cuartas partes de alcohol amílico. El termómetro está provisto además de una graduación suplementaria, hecha

con la prensa hidráulica, y en la cual se ha tenido en cuenta el efecto de las compresiones del depósito. Va de 157 á 628 kg por cm²

545. **Termómetro de inversión. — Tipo Negretti y Zambra. — Perfeccionamiento de M. Chabaud.** — Aunque se les corrija del efecto de la presión, todos los termómetros de máxima carecen de precisión para este último caso, pues dan, no la temperatura de la capa más profunda del mar explorada, sino sólo las temperaturas extremas de toda la profundidad recorrida. No se han podido efectuar medidas rigurosas más que utilizando los *termómetros de inversión*.

Puede citarse como tipo de ellos el modelo de Negretti y Zambra (fig. 552). Es un termómetro de mercurio que presenta en un punto de su vástago una contracción *e* seguida de una ampolla, y que termina en una especie de segundo depósito B, más pequeño que A. El aparato baja enteramente derecho hasta la zona que se trata de explorar. Después de dejarlo allí bastante tiempo, á fin de que se establezca el equilibrio de temperatura se le vuelve en el mismo sitio, invirtiéndolo punta por punta, mediante un mecanismo apropiado. Entonces la columna de mercurio se rompe en *e* y cae en la parte superior del tubo, que hasta entonces estaba libre. Esta parte del tubo ha sido calibrada y graduada de antemano; ella es la que constituye el termómetro propiamente dicho. Sólo falta leer su graduación, una vez que está el aparato á bordo.

No necesitamos decir que el depósito grande debe protegerse contra los efectos de la presión hidrostática, dotándolo de doble envoltura.

M. Chabaud ha introducido afortunadas modificaciones en este precioso instrumento de los exploradores del océano. Primeramente, no pone el depósito termométrico A en la prolongación del vástago; sino que lo encorva (fig. 553) de modo que forma con él una U de ramas casi unidas. El vástago está constituido por dos partes soldadas una á otra : la superior *b* contiene los grados y la inferior *a*, que es mucho más capilar, va á soldarse con el depósito; y entre estas dos partes se encuentra una *cámara preservadora r*, de forma especial, dilatada en el grueso del vidrio. La estrangulación *e* es realizada por una obturación incompleta del canal termométrico, que se produce en el origen mismo del depósito por medio de un vástago *i* (fig. 553), que atraviesa el cilindro de parte á parte y va á unirse por la extremidad opuesta con el vástago.

El instrumento entero está contenido en una envoltura de vidrio grueso, que contiene, en la parte correspondiente al depósito, una masa de mercurio destinada á protegerlo.

Cuando se invierte el instrumento, el peso del mercurio del depósito deja de actuar sobre la estrangulación *e*, — como en el modelo primitivo, — y de este modo se evita un peligro de ruptura. Resulta además de ahí otra ventaja; y es que ya no puede caer en la *cámara preservadora* más que el mercurio procedente de la dilatación sufrida por el termómetro al pasar de las capas frías á las más tibias [1].

546. **Pirómetros.** — Llámase *pirómetros* á unbs instrumentos pro-

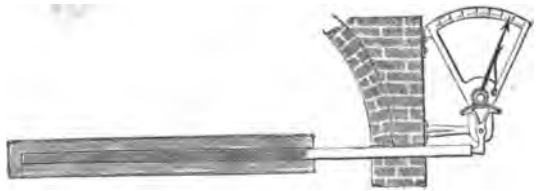


Fig. 554.

pios para medir las altas temperaturas. Brongniart hizo construir para la manufactura de porcelana de Sèvres, un pirómetro (fig. 554), pare-

1. Cuatro instrumentos de este género han funcionado muy bien en manos de M. Thoulet, á bordo del yatch del príncipe de Monaco, en una serie de medidas efectuadas en Boulogne (Mancha).

cido al de cuadrante (fig. 557), y que hablando en propiedad no era sino un piróscopo. Por lo demás, en vida misma de su autor se abandonó este instrumento, porque no daba indicaciones precisas.

Los antiguos tratados de física contenían todos la descripción del pirómetro de Wedgwood, fundado en la propiedad que tiene la arcilla de contraerse cuando se la lleva á temperatura elevada. Á pesar de su imperfección, este instrumento daba solución aproximada de un problema muy importante en el terreno industrial.

Los únicos pirómetros exactos son *el de aire* y el *eléctrico*: más adelante hablaremos de ellos.

Resumen de pirometría. — La pirometría ha efectuado grandes progresos en estos últimos años, tanto en el terreno científico como en el industrial.

1°. *Termómetro normal.* — El termómetro normal de hidrógeno, instalado definitivamente en la oficina internacional de pesas y medidas, permite efectuar medidas de alta precisión en un vasto intervalo de temperatura, desde — 140° hasta 1500° próximamente[1]. Pero este aparato es de uso delicado, su manejo exige gran habilidad, y el volumen considerable de su depósito lo hace poco á propósito para las medidas industriales.

2°. *Termómetro de líquido.* — Los termómetros de líquido son de uso mucho más práctico; pero no pueden servir sino entre temperaturas poco distantes; así se ve con el mercurio, cuyas indicaciones no tienen valor sino en un intervalo de unos 300°.

3°. *Método calorimétrico de Violle.* — Violle ha propuesto un método indirecto, que es un método de calorimetría (668. II). Entre otros resultados importantes, le ha permitido establecer los *puntos de fusión* referidos al termómetro normal, de diferentes metales. Helos aquí: para la plata, 954° C; el oro, 1035°; el cobre, 1054°; el paladio, 1580°; el platino, 1775°; el iridio 1950°.

Esta escala de puntos de fusión constituye la base de la pirometría actual, pues reemplazan á las indicaciones del termómetro normal en la graduación de los diversos pirómetros.

4°. *Pirómetros eléctricos de Siemens, de H. Le Chatelier.* — El método calorimétrico, como el pirómetro de hidrógeno, exige ciertos conocimientos científicos que lo hacen impropio para las medidas industriales propiamente dichas.

Hace próximamente veinte y cinco años, Siemens construyó un pirómetro con una espiral de platino, recorrida por una corriente eléctrica; calculábanse las variaciones de resistencia que resultaban de las variaciones de temperatura.

M. H. Le Chatelier ha utilizado los fenómenos termo-eléctricos. Desde Seebeck se sabe que si se establece una diferencia de temperatura entre las dos soldaduras en un circuito metálico formado por dos metales diferentes soldados punta á punta, se produce allí una corriente eléctrica. Este sistema forma una pila eléctrica, que roba la energía por ella desarrollada á la soldadura caliente. Esta pila puede tener pequeño volumen y la lectura de sus indicaciones puede efectuarse desde una distancia cualquiera del foco. M. Le Chatelier ha adoptado pares de soldadura autógena, formados de platino y de sus aleaciones, graduándolos por medio de los puntos de fusión de Violle. La intensidad de las corrientes termo-eléctricas producidas se mide con un galvanómetro de Arsonval. La duración de la observación varía de 1 á 10 segundos.

M. H. Le Chatelier ha determinado, valiéndose de este aparato, gran número de temperaturas industriales muy importantes, encontrando números generalmente inferiores á los que antes se admitían: por ejemplo, 1580° en vez de 2000° para el acero en fusión; 1370° en vez de 1800° para la cocción de la porcelana dura

5°. *Método de as emperaturas ópticas.* — Los métodos anteriores no pueden servir sino por debajo de 2000°. El que M. Crova imaginó y que se aplica desde

1. Más adelante describiremos el termómetro de hidrógeno.

1880 en las fábricas de Creusot, permite medir las temperaturas más altas.

Este método es un desarrollo científico muy ingenioso de la costumbre que existía en la industria de calcular las altas temperaturas por los colores, rojo oscuro, rojo cereza, rojo blanco, etc., que adquieren los cuerpos incandescentes. Estos cambios de color van acompañados de variaciones de constitución en el espectro de estos cuerpos incandescentes. Pues bien, según M. Crova, la razón entre las intensidades de dos radiaciones determinadas (rojo y verde, por ejemplo) depende únicamente de la temperatura. Ni la sustancia, ni el poder emisivo del cuerpo incandescente que emite estas radiaciones influyen en aquella razón. Basta, pues, comparar, por una medida fotométrica, la intensidad de las radiaciones emitidas por el cuerpo cuya temperatura se quiere valorar *por referencia*, con las radiaciones del *mismo color* emitidas por una lámpara-moderador-tipo, por el ejemplo el cárcel, cuya temperatura se representa por un número arbitrario.

En la industria se comparan las intensidades luminosas adquiridas por un trozo de platino, elevado sucesivamente á las diversas temperaturas que se trata de valorar, con la intensidad constante de una *llama-tipo*. La comparación se referirá á las dos porciones monocromáticas de las radiaciones emitidas, si se tiene cuidado de tamizar las luces á través de un vidrio rojo Appert (Procedimiento Crova, 346).

547. **Termomultiplicador.** — Otro aparato termométrico muy importante se funda en el principio de las corrientes termo-eléctricas: es el *termomultiplicador*.

Descripción. — Consiste en la reunión de dos instrumentos que estudiaremos detalladamente más lejos, el *galvanómetro* de Nobili y la pila *termo-eléctrica* de Melloni (fig. 555). De los polos *m* y *n* de la pila P salen dos alambres de cobre, que se dirigen á dos topes fijos fuera de la caja del galvanómetro G. Por consiguiente, desde que una

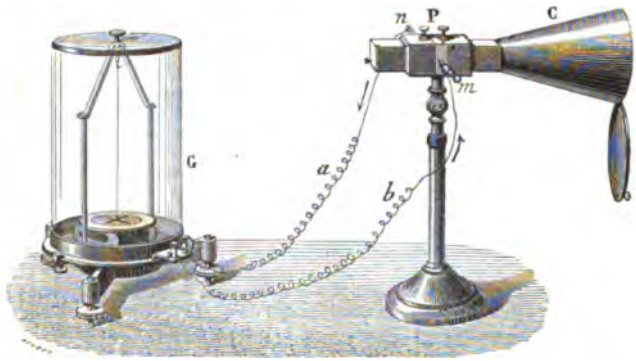


Fig. 555.

corriente *termo-eléctrica* surge por efecto de la caletacción de una de las caras de la pila, esta corriente pasa al galvanómetro por medio del circuito cerrado *mb* G *an* P. Antes de efectuar la medida se tiene cuidado de orientar los hilos del marco galvanométrico paralelamente á la dirección de la aguja. Sólo falta observar la desviación de la aguja en el cuadrante graduado del galvanómetro.

La cantidad de calor recibida por la pila se deduce de la magnitud y del sentido de la desviación. En efecto, la experiencia ha enseñado que hasta 20 grados del galvanómetro, las desviaciones de la aguja son proporcionales á la cantidad de calor que incide sobre la cara expuesta á la radiación. Para las desviaciones mayores, las cantidades de calor correspondientes están dadas por tablas construídas previamente.

Á fin de parar los rayos caloríficos parásitos, se coloca en la cara de la pila que está expuesta al foco de calor, un cono de cobre C barnizado de negro interiormente. El calor se intercepta ó se deja pasar subiendo ó bajando una pantalla redonda que se maneja á voluntad.

Observación. — El termomultiplicador es un verdadero *termómetro diferencial*, pues no indica la temperatura absoluta de la cara de la pila que recibe los rayos caloríficos, sino la diferencia entre esta temperatura y la de la cara opuesta.

CAPÍTULO II

DILATACIÓN DE LOS SÓLIDOS.

548. **Definiciones preliminares. — Coeficientes de dilatación.** — En los cuerpos sólidos se distinguen tres clases de dilataciones: la *dilatación lineal* (quiere decir, según una sola dimensión), la *dilatación cúbica* (esto es, en volumen) y la *dilatación superficial* (en superficie).

Llámase *coeficiente de dilatación lineal* á la prolongación que adquiere la *unidad de longitud* de un cuerpo cuando su temperatura sube de 0° á 1°, y *coeficiente de dilatación cúbica* al aumento que en el mismo caso adquiere la *unidad de volumen.*

Estos coeficientes varían de un cuerpo á otro; para un mismo cuerpo existe entre ellos una relación sencilla: *el coeficiente de dilatación cúbica es triple del de dilatación lineal.*

Fig. 556.

Sea en efecto un cubo cuyo lado tiene una longitud de 1 m. á 0° (fig. 556). Si se representa por λ su *coeficiente lineal*, su longitud á 1° pasará á ser $(1+\lambda)$, y el volumen del cubo, que era 1 á 0°, se convertirá á 1° en $(1+\lambda)^3$, quiere decir en $1+3\lambda+3\lambda^2+\lambda^3$. Ahora bien, como la prolongación λ es siempre una fracción muy pequeña de la longitud total, su cuadrado λ^2 y su cubo λ^3 son fracciones bastante pequeñas para ser despreciadas con respecto de λ. El aumento de unidad de volumen —

que representa el *coeficiente cúbico* — se reduce pues á 3 λ, quiere decir al triple del coeficiente lineal.

Observaciones. — 1°. Esta simplificación de cálculo, por supresión de las potencias de λ superiores á la primera, es *de regla* en todos los cálculos relativos á las dilataciones.

2°. *Excepción á la relación anterior.* — Esta demostración se aplica únicamente á los cuerpos que se dilatan permaneciendo *semejantes á sí mismos*. Pero esto no ocurre más que para los *cuerpos amorfos* y para los *cristalizados en el sistema cúbico;* todos los demás se deforman más ó menos por la dilatación, y ya veremos que no existe relación tan sencilla como la anterior entre sus coeficientes lineal y cúbico (553).

549. **Fórmulas relativas á las dilataciones de los sólidos.** — 1°. Sean l_0 la longitud de una barra á 0°, l_t su longitud á la temperatura t, é λ su coeficiente de dilatación lineal, *supuesto constante* en los límites expresados. Las relaciones que existen entre estas diversas cantidades se consignan en las fórmulas siguientes:

I. Por definición, el alargamiento sufrido por la barra l_0 por efecto de una elevación de temperatura de $t°$ es $l_0 \lambda t$. La longitud de la barra, á $t°$, se ha convertido pues en

$$[1] \qquad l_t = l_0 + l_0 \lambda t = l_0 (1 + \lambda t).$$

II. De la fórmula [1] se deduce

$$[2] \qquad \lambda = \frac{l_t - l_0}{l_0 t},$$

fórmula que sirve para calcular el coeficiente de dilatación λ cuando l_t, l_0 y t son conocidos: este es el *coeficiente medio* de dilatación entre 0° y $t°$.

III. Para las dilataciones cúbicas, se encuentran fórmulas análogas:

$$[3] \qquad V_t = V_0 (1 + Kt) \quad \text{y} \quad K = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \qquad [4]$$

Los binomios $l + \lambda t$ y $1 + Kt$ se designan por los nombres de *binomios de dilatación.*

Las fórmulas [3] y [4] se aplican igualmente á los líquidos y á los gases.

IV. *Sea l_t la longitud de una barra metálica á $t°$; ¿ cuál será su longitud $l_{t'}$ á $t'°$, siendo el coeficiente de dilatación λ?*

Primero se averigua la longitud de la barra á 0°: es $\frac{l_t}{1 + \lambda t}$, según la fórmula [1]; después se pasa de la longitud á 0° á la longitud á t' por medio de la fórmula [1], lo cual da

$$l_{t'} = \frac{l_t (1 + \lambda t')}{1 + \lambda t}.$$

Efectuando la división algébrica indicada, y despreciando los términos en λ^2, λ^3..., resulta

$$[5] \qquad l_{t'} = l_t\,[1 + \lambda(t' - t)].$$

V. *Relación entre el peso específico á 0° y los pesos específicos á diversas temperaturas.* — Cuando se calienta una masa determinada de un cuerpo, su volumen y, por consiguiente, su peso específico varían, pero su peso y masa permanecen constantes. Sean pues P el peso de un cuerpo, V_0 y D_0 su volumen y su peso específico á $t°$, y K el coeficiente de dilatación cúbica. Tiénese evidentemente para dos temperaturas diferentes

$$P = V_0\,D_0 = V_t\,D_t, \quad \text{de donde} \quad \frac{D_0}{D_t} = \frac{V_t}{V_0}.$$

Esta ecuación pone de manifiesto que los pesos específicos varían con la temperatura, en razón inversa de los volúmenes. De ahí se deducen las relaciones siguientes, relativas á los pesos específicos:

$$[6] \qquad D_t = \frac{D_0}{1 + Kt}, \qquad D_{t'} = D_t\,[1 - K\,(t' - t)]. \qquad [7]$$

550. **Medida de los coeficientes de dilatación lineal. — Experiencias de Lavoisier y Laplace.** — Numerosos experimentadores han medido los coeficientes de dilatación lineal. Los primeros resultados precisos se deben á Lavoisier y Laplace (1782), cuyo método y aparato conservan interés histórico.

Descripción del aparato. — La sustancia que se trata de estudiar se introduce en una cuba colocada sobre un hornillo entre cuatro pilares de piedra. Dicha sustancia reviste la forma de una barra de 2 metros de largo. Esta barra se apoya por una punta en una lámina de vidrio *r* (fig. 557, sección vertical), mantenida entre los dos pilares ó montantes de la izquierda; por la otra se puede prolongar libremente en contacto con una segunda lámina de vidrio *v*, fija en un eje hori-

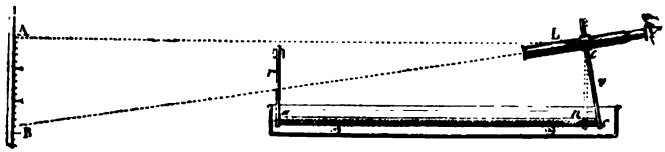


Fig. 557.

zontal de acero, que gira entre dos cojinetes sobre los montantes de la derecha Este eje termina por su extremidad anterior en una pieza de forma de escuadra á la cual está adaptado un anteojo L, que sigue todos los movimientos del eje y de la lámina *v* y que permite dirigir la visual á las divisiones de una escala vertical AB, colocada á 200 metros. Por fin, la barra descansa por cada uno de sus extremos en dos rodillos de vidrio, de manera que no encuentra al prolongarse sino resistencia muy escasa.

Operación. — Primero se echaba hielo en la cuba, y estando la barra á cero, y las dos láminas *v* y *r* en contacto con ella y el anteojo en una dirección horizontal, se observaba á qué división correspondía el hilo del anteojo en la escala

AB; después se retiraba el hielo, se llenaba la cuba de agua ó de aceite y se calentaba. Dilatábase la barra y cuando la temperatura había llegado á ser estacionaria, se tomaba nota, por una parte de la temperatura del baño con termómetros introducidos en él y por otra de la división de la escala vista con el anteojo.

De estos datos se deducía el aumento de longitud de la barra. En efecto, habiéndose alargado ésta una cantidad *nc*, el vástago *v* es rechazado y arrastra consigo el eje y el anteojo; este último se inclina entonces en la dirección *o*B. Pero los dos triángulos *onc* y *o*AB son semejantes, por tener sus lados perpendiculares uno á uno; de ahí se deduce

$$\frac{nc}{AB} = \frac{on}{oA}, \quad \text{de donde} \quad nc = AB.\frac{on}{oA}.$$

Ahora bien el cociente $\frac{on}{oA}$ es un número constante que se había medido por una experiencia preliminar, sustituyendo á la barra *ac* una segunda barra más larga en una cantidad conocida : se había hallado

$$\frac{on}{oA} = \frac{1}{744}, \quad \text{de donde} \quad nc = \frac{AB}{744}.$$

Dividiendo *nc* por la longitud de la barra á 0° y por la temperatura del baño, se tenía el *coeficiente de dilatación lineal* de la sustancia.

551. **Método del comparador.** — Para medir *con precisión* la dilatación lineal de una regla ó de una barra dada, se emplea actualmente el *comparador* ya descrito (88). En vez de tratar de amplificar el aumento de longitud, según hicieron Laplace y Lavoisier, se le mide tal como es en el microscopio. La regla que se ha de estudiar está colocada en la artesa A (fig. 78) y en la A' se coloca una regla-tipo. Llévase el agua á las artesas á las temperaturas T y *t* por medio de agitadores y de aparatos sepeciales, llamados *termo-reguladores*, que permiten realizar temperaturas constantes y uniformes.

Estando dispuesta la artesa A bajo los microscopios, se anotan las indicaciones de los termómetros y se llevan los retículos á coincidir con los trazos que limitan la longitud de la barra. Los retículos distan entonces uno de otro exactamente la longitud L_t de la barra á *t* grados.

Sustitúyese entonces la artesa A' á la artesa A, y después se repiten las mismas lecturas. Ha sido necesario mover los retículos una longitud evidentemente igual á la diferencia $(L_t - l_T)$ de las dos reglas á las temperaturas respectivas de *t* y T.

Actuando sobre el termo-regulador de la artesa A, seda á la temperatura un nuevo valor *t'* y se mide como precedentemente la diferencia $(L_{t'} - l_T)$.

Si se llama L_0 la longitud á cero de la barra y *x* el coeficiente de la dilatación media, se tiene

$$L_t = L_0(1 + xt) \quad \text{y} \quad L_{t'} = L_0(1 + xt');$$

por consiguiente llamando *a* y *b* á diferencias medidas directamente, se tiene

$$L_0(1 + xt) - l_T = a \quad \text{y} \quad L_0(1 + xt') - l_T = b,$$

de donde

$$\frac{1+xt}{1+xt'}=\frac{a+l_T}{b+l_T} \quad \text{y} \quad x=\frac{a-b}{tl_T-t'l_T}.$$

La longitud l_T de la regla-tipo es por lo demás conocida á todas las temperaturas; es, pues, fácil calcular x, toda vez que la experiencia de comparación suministra directamente a, b, t y t'.

Observación: *Aparato de Roy y Ramsden.* — Ya antes se habla usado por el mayor Roy (de Londres) en 1787, un aparato análogo al comparador, pero mucho menos exacto, que fué construido por Ramsden. Ese instrumento no presenta hoy sino interés puramente histórico.

552. **Resultados generales relativos á la dilatación de los sólidos.** — Los principales resultados de las diversas experiencias efectuadas sobre la dilatación de los cuerpos sólidos no cristalizados, son los siguientes:

1°. La dilatación del vidrio y de los metales es uniforme entre 0° y 100°, quiere decir que el coeficiente de dilatación de estas sustancias es sensiblemente constante entre esos límites, y que su dilatación es proporcional á la elevación de temperatura.

2°. Pasados 100°, el coeficiente de dilatación de estos cuerpos deja de ser constante: aumenta cuando la temperatura sube. El acero templado parece experimentar una variación inversa: su coeficiente disminuye cuando la temperatura sube.

3°. La mayor parte de los cuerpos sólidos, después de haberse dilatado por la calefacción entre 0° y 100°, se contraen por enfriamiento, hasta recobrar su volumen inicial. Algunos se exceptúan de esta regla, como el zinc y el vidrio.

4°. Los coeficientes de *dilatación lineal de los medios* que han sido obtenidos por varios experimentadores, varían para una misma sustancia entre límites bastante extensos. Así, el del zinc oscila desde 294 hasta 341 *diez millonésimos* entre 0° y 100°; el de la fundición de hierro desde 98 hasta 112 diez millonésimos. Estas divergencias dependen primeramente de la imperfección de los métodos de medida, y después de la variabilidad de estructura de los ejemplares de los diversos cuerpos que se han sometido á las experiencias.

553. **Dilatación de los cristales. — Dilatómetro de Fizeau.** — Hemos dicho que los cuerpos sólidos homogéneos y amorfos se dilatan permaneciendo semejantes á sí mismos. Mischerlich descubrió en 1823 que no ocurre lo mismo con la mayor parte de los cuerpos sólidos cristalizados. El estudio de su dilatación irregular fué hecho por Fizeau, mediante método muy delicado. Consiste esencialmente en producir anillos de Newton por la superposición de un plano de vidrio y de una lámina delgada del cristal que se trata de estudiar, y en observar después el movimiento de los anillos que ocurre cuando se eleva la temperatura del cristal. De este movimiento se deducen con gran precisión las dilataciones sufridas por la lámina en un sentido perpendicular á sus caras.

El aparato se compone de una plataforma S de platino iridiado, provista de tres tornillos de nivel v que se apoyan en un plano F y que sostienen una lente L, cuya cara inferior es casi plana y tiene puntos de referencia dispuestos al

tresbolillo (fig. 558). Entre la plataforma y la lente se coloca un pedazo del cuerpo que se trata de estudiar C[1], terminado por dos caras paralelas y bien pulidas. Los anillos de Newton se originan en la lámina de aire encerrada entre L y C y son examinados por reflexión total en el prisma D. El trípode se dispone dentro de una estufa de cobre rojo EE cuya temperatura se lee en el termómetro *t*; la estufa se mantiene caliente á temperatura constante por medio de un termo-regulador RR.

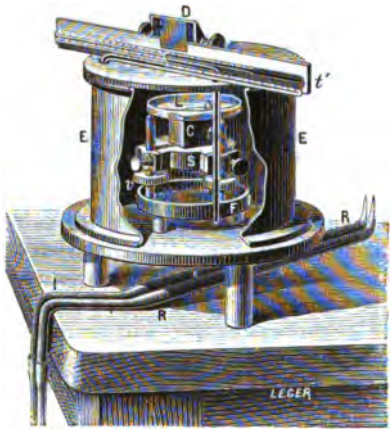


Fig. 558.

Resultados generales. — Los principales resultados son los siguientes :

I. *Sistema cúbico* (ejemplos : *sal gema, alumbre*). *La dilatación es la misma en todas direcciones.*

No hay, pues, más que un coeficiente único de dilatación, λ, que es igual á la tercera parte del coeficiente cúbico. De manera que los cristales de este sistema se dilatan de la misma manera que los cuerpos amorfos.

II. *Sistema cuadrático* (ejemplos : *circón ó silicato de circonio, cianoferruro de potasio*).

III. *Sistema romboédrico* (ejemplo : *cuarzo*).

Los sistemas II y III presentan la misma anomalía en su dilatación : tienen dos coeficientes de dilatación lineal, uno λ', según el eje principal, y otro λ, según cualquier otra dirección perpendicular al eje.

De ahí resulta que el coeficiente cúbico K está dado por la ecuación $K = \lambda + 2\lambda'$.

IV. *Sistema ortorómbico* (ejemplos : *nitro, sulfato de magnesia*).

V. *Sistema clinorrómbico* (ejemplo : *sulfato de cal*).

VI. *Sistema disimétrico* ú *oblicuo* (ejemplo : *feldespato*).

Estos tres últimos sistemas presentan la misma anomalía. Tienen tres coeficientes lineales diferentes λ, λ', λ'', según tres direcciones rectangulares.

Esas direcciones son las mismas de los ejes en el cuarto sistema; pero no están determinados, y carecen de relaciones simples con las de los ejes, en los dos últimos sistemas.

VII. *Anomalía del yoduro de plata.* — *Dilataciones negativas.* — Fizeau descubrió además que el *yoduro de plata* tiene la propiedad de *contraerse* cuando *sube* la temperatura y de *dilatarse* cuando la temperatura *baja*. El fenómeno permanece siendo perfectamente regular y continuo desde — 10° hasta + 70°. De manera que la dilatación del yoduro de plata debe ser expresada entre estos límites, por un *coeficiente negativo*.

Los romboedros de espato *se dilatan*, por el contrario, en la dirección del eje cristalográfico principal, mientras que se contraen en las direcciones perpendiculares. El *berilo* (cierta variedad de esmeralda) presenta una anomalía análoga á la del yoduro de plata cristalizado : su dilatación es *negativa* según el eje principal y *positiva* (aunque muy pequeña) según la dirección perpendicular al eje.

554. Aplicaciones de la dilatación de los sólidos. — Péndulos compensadores. — La desigual dilatación de los metales ha recibido importante aplicación en los *péndulos compensadores*. La dilatación

1. El cuerpo no es necesariamente un cristal. El método es general y el aparato, tal como está instalado en la oficina internacional, con el nombre de *dilatómetro*, puede aplicarse á un sólido cualquiera.

inevitable de la varilla *se compensa* en ellos de manera que la distancia entre el centro de suspensión y el de oscilación permanece independiente de la temperatura: condición necesaria para que el isocronismo sea invariable. Se han propuesto numerosos sistemas de compensación.

Péndulo de Leroy ó péndulo de varillas. — 1°. *Descripción.* — En este aparato, la lentejuela L (fig. 559) está suspendida de una serie de bastidores encajados uno en otro, y cuyas ramas verticales son varillas de acero y de latón alternas. Hay cinco de las primeras, más una lámina de acero *b*, que sostiene todo el péndulo y se encorva á cada oscilación; las otras, en número de cuatro, son de cobre amarillo. La varilla *i*, que sostiene la lentejuela L, está fija por su parte superior en una traviesa horizontal; pero en su parte inferior es libre y pasa por dos agujeros cilíndricos practicados en las traviesas inferiores. El aumento de longitud de las varillas de acero no puede efectuarse sino de arriba abajo, y por el contrario, el de las varillas de latón de abajo arriba. Por consiguiente, para que la longitud del péndulo permanezca constante, es necesario y basta que la prolongación de las varillas de cobre levante constantemente la lentejuela exactamente la misma cantidad que tiende á bajarla el aumento de dimensión de las varillas de acero.

Fig. 559.

2°. *Condición de compensación.* — Únicamente las varillas *de acero* *d*, *e*, *i*, añaden sus efectos al de la lámina *b* para bajar la lentejuela; pues las otras dos varillas de acero, que son simétricas de *d* y de *e*, están unidas respectivamente á éstas por medio de traviesas, de modo que sus prolongaciones se efectúan paralelamente á los de estas varillas sin agregarse á ellos. También hay que considerar las varillas de *latón* *c* y *n*, situadas á un mismo lado del eje.

Representemos por a, a', a'', a''' las longitudes de las varillas de acero *b*, *d*, *e*, *i*, y por c y c' las de las varillas de latón *c*, *n*; y digamos que

$$a + a' + a'' + a''' = l \quad \text{y} \quad c + c' = l'.$$

Si se llaman k y k' los coeficientes de dilatación lineal del acero y del cobre amarillo, las prolongaciones de los dos metales, á t grados, serán respectivamente lkt y $l'k't$. Para que la longitud total L del péndulo permanezca constante precisa pues que se tenga.

$$lkt = l'k't, \quad \text{ó} \quad lk = l'k'. \qquad [1]$$

Tal es la *condición de compensación*. Significa que *en el péndulo compensador, las longitudes totales del acero y del cobre deben estar en razón inversa de los coeficientes de dilatación de estos metales.*

Además, como esta igualdad no contiene t, se deduce de ella que *la compensación se efectúa á todas las temperaturas.*

3°. *Longitudes totales del latón y del acero.* — Conociendo la longitud total L del péndulo, es posible determinar las longitudes totales, l y l', del acero y del latón, necesarias para realizar la compensación. La longitud total del péndulo se compone primeramente de la varilla b, y después de la varilla i (hasta el centro de la lente), y por fin de los dos intervalos que separan los tres bastidores. Ahora bien, el primero de estos intervalos es evidentemente igual á la diferencia de las varillas d y c, y el segundo á la de las varillas e y n. Tiénese pues

$$L = a + a''' + (a' - c) + a'' - c''),$$

de donde

$$[2] \qquad L = (a + a' + a'' + a''') - (c + c') = l - l'.$$

Las ecuaciones [1] y [2] anteriores determinan l y l'. Resolviéndolas se encuentra

$$[3] \qquad l = \frac{L}{1 - \frac{k}{k'}} \qquad \text{y} \qquad l' = \frac{L}{\frac{k'}{k} - 1}.$$

Estas fórmulas hacen ver que l y l' son más grandes que L : para satisfacer á esta condición hay que recurrir en el péndulo de segundos á varios bastidores de acero y de latón (se toma k generalmente igual á 0,00001079 y k' á 0,00001878).

555. **Compensador Graham.** — Este péndulo está formado de una varilla de hierro fig. 560) que sostiene, por medio de un montante de cristal, dos cilindros de cristal casi llenos de mercurio. De manera que el centro de gravedad baja por efecto de la dilatación de la varilla, pero sube á consecuencia de la del mercurio. Hay que calcular la altura del mercurio que se necesita emplear para obtener una compensación perfecta.

Graham, el inventor de este procedimiento de compensación, suspendía su péndulo por medio de una varilla de *vidrio* en vez de hierro. También se puede no poner sino un tubo de vidrio para mercurio en lugar de dos.

Fig. 560.

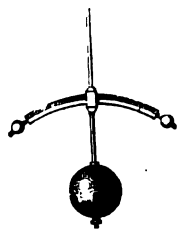


Fig. 561.

556. **Láminas compensadoras.** — **Compensador Martin.** — También se llega á compensar el aumento de longitud de la varilla de los péndulos por medio de *láminas compensadoras.* Se da este nombre á dos láminas de cobre y de hierro soldadas entre sí y fijas en la varilla del péndulo. La lámina de cobre, que es la más dilatable, se pone debajo de la de hierro.

Cuando baja la temperatura, la varilla del péndulo se acorta y la lentejuela sube; pero entonces se encorvan las láminas compensadoras, porque el cobre se contrae más que el hierro. De esta manera descienden dos bolas metálicas dispuestas en las extremidades de las láminas (fig. 561) y, si su masa es apropiada, se establece una compensación entre los puntos que se acercan al eje de suspensión y los que se alejan de éste, lo que hace que el centro de oscilación no cambie de lugar. Si la temperatura sube, la lentejuela baja, pero las bolas se levantan y hay también compensación.

Tal es el principio del *péndulo compensador Martin.* Este es un instrumento de la clase ordinaria, cuya varilla sostiene un sistema de *láminas compensadoras*, terminadas en dos pesadas bolas *de oro.* Las dimensiones se calculan de manera que la compensación se establezca perfectamente, con arreglo al mecanismo an-

terior. Y como las bolas pueden deslizarse sobre las láminas, por medio de los tornillos de presión que las fijan en una posición dada, se puede, moviéndolas por tanteos, llegar á obtener la compensación.

CAPÍTULO III

DILATACIÓN DE LOS LÍQUIDOS.

557. **Definiciones preliminares.** — *Dilatación aparente y dilatación absoluta.* — En los líquidos hay que considerar la *dilatación absoluta y la dilatación aparente*. Esta última es el aumento de volumen que *parece* adquirir un líquido en un vaso que se dilata menos que él : tal es la del mercurio y del alcohol observada en los termómetros. La dilatación *absoluta ó real* es el aumento de volumen que el líquido *experimenta* en realidad dentro de su continente.

Fig. 562.

Pónese de manifiesto la influencia del vaso introduciendo en agua caliente un termómetro de gran depósito, lleno hasta la mitad de su vástago de alcohol coloreado (fig. 562). En el momento de entrar el agua en el depósito, el alcohol baja en el tubo, de *b* hasta *a*, lo que procede evidentemente de la dilatación de las paredes; pero si el depósito permanece sumergido, el alcohol se calienta y sube una cantidad igual á su dilatación absoluta menos la del vaso.

De manera que en los líquidos se distingue el *coeficiente de dilatación aparente y el de dilatación absoluta.*

Relación entre los dos coeficientes. — Se puede demostrar rigurosamente que *el coeficiente de dilatación absoluta* Δ *de un líquido es igual á su coeficiente de dilatación aparente* δ, *más el coeficiente de dilatación* K *del vaso que lo contiene.*

En efecto, tomemos como unidad de volumen el de una masa determinada de un líquido á 0°. Elevemos un grado la temperatura de este líquido : el volumen *aparente*, en el vaso que lo contiene, pasa á ser $1 + \delta$; pero cada unidad de capacidad del vaso se ha convertido á su vez en $1 + K$, pasando de la temperatura 0° á la temperatura 1°. Luego el volumen del líquido dilatado es, en *realidad*, igual á $(1 + \delta)(1 + K)$.

Se tiene pues

$$1 + \Delta = (1 + \delta)(1 + K) = 1 + \delta + K + \delta K.$$

Suprimiendo la unidad en ambos términos, lo mismo que el producto δK, queda

$$\Delta = \delta + K.$$

según se quería demostrar.

558. **Dilatación absoluta del mercurio : Experiencias de Dulong y Petit.** — *Principio del método.* — Para determinar el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio, era pues necesario eliminar la dilatación del vaso. Dulong y Petit lo consiguieron aplicando este principio de hidrostática : *Las alturas de dos líquidos que se encuentran en equilibrio dentro de dos vasos comunicantes están en razón inversa de sus densidades* (124).

Descripción del aparato. — El aparato se componía de dos tubos de vidrio, A y B (fig. 563) reunidos por medio de un tubo capilar, y mantenidos verticalmente en un montante de hierro KM. Este montante podía ser colocado horizontalmente gracias á tornillos de nivel, valiéndose de dos niveles de burbuja de aire *m* y *n*. Cada uno de los

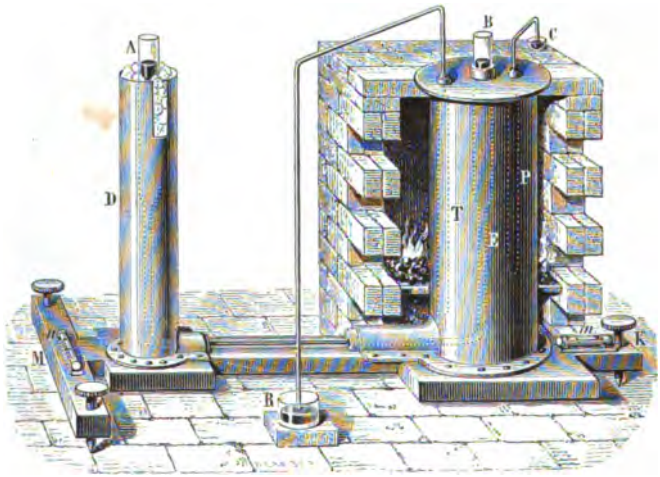


Fig. 563.

dos tubos estaba envuelto en un cilindro metálico, el menor de los cuales, D, se llenaba de hielo machacado, y el otro, E, de aceite que se calentaba gradualmente por medio de un hornillo (la figura representa este hornillo abierto á fin de que se vea el cilindro). Por último, los ubos A y B se llenaban de mercurio : el nivel era idéntico en ambos cuando estaban á la misma temperatura, pero se elevaba poco á poco en el tubo B, á medida que éste iba calentándose.

Método. — Sean h_0 la altura á 0° del mercurio en el tubo A, sobre el eje del tubo horizontal, y d_0 su densidad, y sean h_t y d_t los mismos datos para el tubo B, á la temperatura t.

Tiénese $$h_0 d_0 = h_t d_t.$$
Además, tenemos
$$d_t = \frac{d_0}{1 + \Delta t}$$

(siendo Δ el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio). Sustituyendo resulta

$$\frac{h_t d_0}{1 + \Delta t} = h_0 d_0; \quad \text{de donde se deduce} \quad \Delta = \frac{h_t - h_0}{h_0 t}.$$

Bastaba pues con calcular th_0 y la diferencia $h_t - h_0$.

Dulong y Petit empezaban por tomar la temperatura por medio de un termómetro de peso P (559) cuyo mercurio se derramaba en una cápsula C, y además con un *termómetro de aire* T (575). — Cuanto á las alturas h_0 y $h_t - h_0$, las medían con el catetómetro.

Resultados. — Así hallaron que el coeficiente medio de dilatación absoluta del mercurio es $\frac{1}{5550}$ entre 0° y 100° y que aumenta con la temperatura. Entre 100° y 200° pasa á ser $\frac{1}{5425}$, y $\frac{1}{5300}$ entre 200° y 300°. Sin embargo, de — 36° á 100°, la dilatación del mercurio es sensiblemente *regular*.

Crítica del método. — Experiencias de Regnault. — El método precedente incluía varias causas de error. Primeramente, la temperatura t era siempre incierta, porque no se podía agitar el baño de aceite y en consecuencia igualar su temperatura en el momento de observar los termómetros. Además, como los vasos comunicantes A y B no tienen sino una altura de 0,55 m próximamente, la diferencia de los niveles $(h_t - h_0)$ era demasiado pequeña en valor absoluto y el error relativo cometido en esta lectura muy grande.

Regnault continuó estas experiencias con toda la precisión característica de su método, y obtuvo resultados casi concordantes con los de Dulong y Petit. Halló en efecto que el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio es $\frac{1}{5547}$ entre 0° y 50°, y que este coeficiente crece de manera continua á medida que la temperatura sube.

La dilatación total de la unidad de volumen entre los límites 0° y T° puede expresarse por la fórmula empírica

$$\Delta_T = aT + bT^2.$$

Los coeficientes a y b dependen de la temperatura T. Entre los límites 0° y 300°, sus valores, determinados por experiencias directas, son

$$a = 0{,}000179 \quad \text{y} \quad b = 0{,}00000002522.$$

559. **Coeficiente de dilatación aparente del mercurio : Experiencias de Dulong y Petit.** — El coeficiente de dilatación aparente de un líquido varía con la naturaleza del vaso que lo contiene. El del mer-

curio en el vidrio fué determinado por Dulongy Petit, valiéndose del *termómetro de peso*.

El aparato consiste en un depósito cilíndrico de vidrio á que está soldado un tubo capilar, encorvado en ángulo recto y abierto en su extremidad (fig. 564). Pésasele, primero vacío, y después lleno de mercurio á 0°; la diferencia de las dos pesadas representa el peso P del mercurio contenido en el aparato á 0°. Si después se le eleva á una temperatura conocida t, el mercurio se dilata, y sale cierta cantidad de él que se recoge en una pequeña cápsula y que se pesa : sea p el peso del mercurio vertido; el del mercurio que permanece en el aparato es $P - p$.

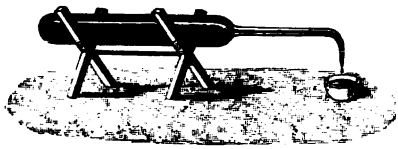


Fig. 564.

El volumen ocupado á 0° por esta masa de mercurio es evidentemente $\frac{P-p}{d_0}$, llamando d_0 al peso específico á 0° del mercurio. Esta misma masa ocupaba á t° el *volumen aparente* total del termómetro. Este volumen aparente ha sido aforado á 0°, viéndose que es igual á $\frac{P}{d_0}$. La dilatación aparente total del mercurio ha sido pues

$$\left(\frac{P}{d_0} - \frac{P-p}{d_0}\right) \quad \text{ó} \quad \frac{p}{d_0},$$

y el coeficiente de dilatación aparente será

$$\delta = \frac{\frac{p}{d_0}}{\frac{(P-p)\,t}{d_0}} \quad \text{ó} \quad \delta = \frac{p}{(P-p)\,t}.$$

Tal es la fórmula llamada del *termómetro de peso*.

Resultados. — De esta manera hallaron Dulong y Petit que el coeficiente de dilatación aparente del mercurio en el vidrio es $\frac{1}{6480}$.

560. **Termómetro de peso.** — Este aparato ha recibido el nombre de *termómetro de peso*, porque del peso del mercurio vertido se puede deducir la temperatura á que ha llegado el instrumento. Efectivamente, como la experiencia anterior ha conducido á la fórmula

$$\frac{p}{(P-p)\,t} = \frac{1}{6480}.$$

se deduce

$$t = 6480.\ \frac{p}{P-p},$$

expresión que da el valor de t cuando se conocen P y p.

561. **Coeficiente de dilatación del vidrio.** — Se puede deducirlo del coeficiente de dilatación absoluta del mercurio, obtenido directamente, y del coeficiente de dilatación aparente, medido en un vaso de este mismo vidrio. Tomando, pongamos por ejemplo, los dos coeficientes de Dulong y Petit, se halla para el vidrio que ellos usaron

$$K = \frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38671} = 0{,}00002585^{1}.$$

562. **Coeficiente de dilatación de los diversos líquidos.** — I. *Método de determinación.* — El método general de determinación se funda también en la relación $\Delta = k + \delta$.

Resultados generales. — 1°. *Definición del coeficiente medio entre* t *y* t'. — Sean v y v' los volúmenes á t^0 y t'^0; el coeficiente medio entre t^0 y t'^0 es $\frac{1}{v}\frac{v'-v}{t'-t}$. Y si la variación $t' - t$ de temperatura es muy pequeña, se podrá decir que es el coeficiente á la temperatura media θ entre t^0 y t'^0. Ese coeficiente medio caracteriza la dilatabilidad del líquido á esta temperatura y á la presión constante á que se calienta el cuerpo; varía con esta temperatura y con esta presión.

2°. *Experiencias de Amagat.* — Amagat estudió las leyes de estas variaciones entre límites muy extensos de presión y de temperatura, enunciando los resultados siguientes, aplicables á todos los líquidos que estudió, menos el agua.

A. El coeficiente de dilatación de los líquidos *disminuye regularmente* cuando la presión *aumenta;* esta disminución es tanto más rápida cuanto más elevada es la temperatura.

(Por ejemplo, el coeficiente medio del éter entre 0^0 y 20^0 es : 0,001582 bajo 1 atm, 0,000894 bajo 1000 atm, 0,000680 bajo 2000 atm, 0,000579 bajo 3000 atm).

B. El coeficiente de dilatación de los líquidos *aumenta regularmente* cuando la temperatura *sube:* este aumento es tanto *menos rápido* cuanto *más fuerte* es la presión, y dada una presión suficiente, llega á ser *insensible.*

(Por ejemplo, bajo la presión constante de 200^{at}, el coeficiente del éter es igual á : 0,001320 entre 0^0 y 20^0, — 0,001469 entre 40^0 y 60^0, — 0,001614 entre 80^0 y 100^0, — 0,002156 entre 138^0 y 198^0; bajo la presión de 1000 atm este coeficiente es sensiblemente constante entre estos límites é igual á 0,0009).

3°. *Enorme dilatabilidad de los líquidos muy volátiles. — Experiencias de Drion, de Amagat, y de Cailletet y Mathias.* — Ciertos líquidos muy volátiles y que entran en ebullición á bajas temperaturas, — tales como los gases convertidos en líquidos, — poseen una dilatabilidad comparable y aun superior á la de los gases.

Ya en 1836 señaló Thilorier la enorme dilatación que experimenta el ácido carbónico líquido entre 0^0 y 30^0, considerándola igual á 4 veces la del aire en las mismas condiciones.

Las experiencias de Drion han confirmado esta curiosa anomalía respecto de tres líquidos volátiles, de naturaleza muy diferente, el éter clorhídrico, el ácido hiponítrico y el ácido sulfuroso. Para el éter clorhídrico, el coeficiente de dilatación *llega* al del aire á la temperatura de 110^0, y *se hace tres veces mayor* á 930^0. Para el ácido hiponítrico, el coeficiente es *mayor* que el del aire desde 110^0. Para el ácido sulfuroso, el coeficiente es igual al del aire desde 80^0, y *triple* del mismo á 130^0.

Según las experiencias de Amagat, el coeficiente medio del ácido carbónico líquido, entre 2^0 y 30^0 y bajo la presión de 75 atm, es igual á 0,02166, sea *siete veces* el de los gases perfectos.

Puede llegar á ser aún mucho mayor, pues *á la temperatura y bajo la presión crítica* (632), su valor se convierte en *infinito.*

1. Para el vidrio ordinario de los tubos de química, se emplea con frecuencia en los cálculos el número aproximado $\frac{1}{38700}$. Regnault obtuvo 0,0000254.

Así resulta, efectivamente, de los experimentos de Cailletet y Mathias, que han estudiado el ácido sulfuroso hasta la temperatura y presión críticas. Estos experimentadores hallaron : entre 156° y 155°,5, $\alpha = 0,7371$; entre 155°,5 y 155°, $\alpha = 0,2273$; entre 155° y 154°, $\alpha = 0,1345$; entre 152° y 150°, $\alpha = 0,4457$. Vése que en el último medio grado el coeficiente medio es igual á 200 veces próximamente el coeficiente de dilatación de los gases, y el *coeficiente verdadero* se hace *infinito* á la temperatura crítica.

563. **Máximum de densidad del agua.** — La ley de dilatación del agua es completamente distinta de la de los demás líquidos. En efecto, el agua presenta el fenómeno notable de que, cuando baja su temperatura, no se contrae más que hasta 4° ; por debajo de este punto, aunque el enfriamiento continúe, no sólo cesa la contracción sino que el líquido se dilata hasta el punto de congelación, que ocurre á cero : de modo que á 4° el agua experimenta un máximum de contracción.

Experiencia de Hope. — Demuéstrase este hecho experimentalmente, por medio del aparato clásico de Hope. Se toma una probeta de pie taladrada lateralmente por dos agujeros, — uno en la parte superior y otro en la inferior, — donde están fijos dos termómetros (fig. 565); la parte media de esta probeta está rodeada por un cilindro lleno de hielo ó de una mezcla frigorífica. Ahora bien, lleno el vaso de agua á 10° ó 12°, se observa que el termómetro superior permanece casi estacionario, mientras que el inferior baja rápidamente hasta 4°, y después se queda parado á su vez, mientras que el termómetro superior empieza á bajar, no sólo hasta 4° sino hasta 0°. De ahí se deduce que mientras el agua se enfría hasta 4°, va aumentando de densidad, puesto que se dirige á la parte inferior de la probeta; pero que al enfriarse más se dilata, toda vez que entonces se eleva hacia la parte superior. Luego, *alcanza su máximum de densidad á 4°.*

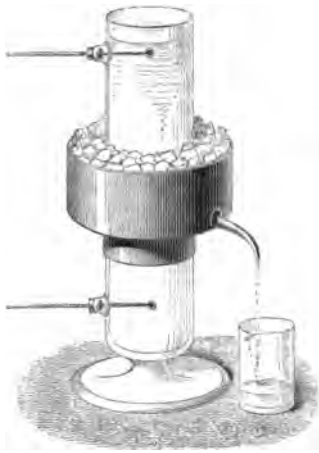


Fig. 565.

Experiencias de Hallstrom. — Posteriormente pesó Hallstrom, en agua á diferentes temperaturas, una bola de vidrio lastrada con arena. Teniendo en cuenta la dilatación del vidrio, observó que donde la bola experimentaba el empuje máximum era en el agua á 4°,1; por consiguiente, á esa temperatura debía obtenerse el máximum de densidad de dicho líquido.

Experiencias de Despretz. — Despretz ha confirmado por otro método que este fenómeno se produce realmente á 4°. Al efecto se sirvió de un termómetro de agua, es decir, que contiene agua en vez de mercurio. Enfriándolo poco á poco en un baño cuya temperatura estaba dada por un termómetro de mercurio, y teniendo

en cuenta la contracción del vidrio, averiguó que el máximum de contracción, y por tanto de densidad del agua ocurre efectivamente á 4° en el termómetro de este líquido.

Este físico construyó una tabla de las densidades del agua desde — 9° hasta 100°, tomando como unidad la del líquido á 4°.

Dicha tabla permite darse cuenta de que la densidad del agua disminuye muy irregularmente desde 4° á 100° y que, en consecuencia, hay una variación inversa, muy irregular, de su coeficiente de dilatación.

564. **Cambio del máximum de densidad por efecto de la presión.** — *Experiencias de Amagat.* — Los resultados precedentes se refieren á la presión *normal.* Cuando la presión cambia, también varía la temperatura del máximum. Según los experimentos de Amagat, que son los más extensos realizados hasta el presente en este terreno, esta temperatura baja próximamente 1° por 50 atmósferas de presión, de manera que bajo 200 atmósferas ya no hay máximum de densidad por encima de cero.

Por lo demás, la anomalía que presenta el agua se refiere, no sólo á las leyes de la dilatación, sino también á las de la compresibilidad; esta anomalía desaparece á medida que aumenta suficientemente la temperatura ó la presión; según los trabajos de Amagat, á una presión cercana á 3000 atmósferas las anomalías acaban por completo y el agua vuelve á entrar en el caso normal de los demás líquidos.

565. **Máximum de densidad de las soluciones salinas.** — Despretz probó también que el agua del mar y algunas disoluciones salinas presentan la anomalía del máximum de densidad; y observó que la presencia de las sales disueltas en el agua baja la temperatura de ese máximum. La de congelación de dicho líquido desciende también por el mismo motivo, pero no tanto. Así, el agua de mar, que se congela á — (1°,70), no tiene su máximum de densidad más que á — (3°,67). Del mismo modo, cierta disolución de sal marina, que se congela á — (2°,12), no alcanza su máximum de densidad sino á — (4°,75). De ahí resulta que la observación del máximum es bastante difícil en estos líquidos, pues hay que evitar que el cambio de estado se produzca antes del máximum de densidad. Esto se logra utilizando el fenómeno de la *sobrefusión*, que más adelante estudiaremos. El agua del mar, siempre agitada, se congela siempre antes de llegar á temperatura bastante baja para alcanzar su máximum de densidad.

566. **Aplicación del termómetro de peso á la medida de las dilataciones cúbicas.** — Dulong y Petit aplicaron el método del termómetro de peso á la medida de los coeficientes de dilatación cúbica de los sólidos. Para ello tomaban un tubo de vidrio algo grueso, é introducían en él la sustancia, en forma de prisma prolongado, después

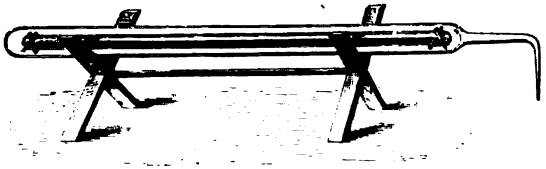


Fig. 566.

de determinar su peso y luego la densidad á cero. Después estiraban la extremidad del tubo en la lámpara, y la encorvaban de manera que tomaba la forma de un termómetro de peso (fig. 566). Una vez así las cosas, llenaban de mercurio el espacio que quedaba libre en el tubo, y determinaban el peso de este líquido *allí contenido á cero.* Hecho esto, se elevaba el aparato á una temperatura conocida t; el

mercurio y el cuerpo contenidos en el tubo se dilataban entonces más que el vidrio, y salía al exterior una cantidad p de mercurio que se pesaba.

Entonces expresaban que *el volumen á t° del mercurio expulsado es igual á la dilatación del cuerpo*, más *la del mercurio*, menos *la del vidrio*.

Sean P el peso y m el coeficiente de dilatación absoluta del mercurio que llena el tubo á 0°, P′ el peso de la barra metálica, x su coeficiente de dilatación, y K el del vidrio, d y d' las densidades del mercurio y del metal. Tiénese la ecuación

$$\frac{P}{d} mt + \frac{P'}{d'} xt - \left(\frac{P}{d} + \frac{P'}{d'}\right) Kt = \frac{p}{d}(1 + mt).$$

en que todas las cantidades son conocidas, excepto x.

Observación. — Este método no puede aplicarse evidentemente más que á los cuerpos no atacables por el mercurio, tales como el hierro ó ciertos óxidos metálicos.

CAPÍTULO IV

DILATACIÓN DE LOS GASES.

567. **Experiencias de Gay-Lussac.** — Hemos visto precedentemente que los gases son los más dilatables de todos los cuerpos. Su dilatación fué estudiada casi al mismo tiempo por Gay-Lussac en Francia y por Dalton en Inglaterra.

Aparato de Gay-Lussac. — Consistía en un tubo termométrico AB (fig. 567) cuyo vástago estaba dividido en partes de igual capacidad. Pesando sucesivamente el mercurio contenido en la bola A y el que hay en el vástago, se determinaba la relación que existía entre la capacidad de una división del vástago y la del depósito. Para introducir aire seco en el tubo, Gay-Lussac lo llenaba primeramente de mercurio que hacía hervir á fin de expulsar la humedad. Después fijaba la extremidad del vástago por medio de un tapón á un tubo más grueso C, lleno de cloruro de calcio, sustancia muy ávida de agua. Manteniendo el sistema de los tubos AB y C en posición vertical, abajo el C, introducía en éste y en el vástago un fino alambre de platino. Agitándolo ligeramente, este alambre arrastraba consigo gotecillas de mercurio, que eran reemplazadas por burbujas de aire, las cuales entraban por el tubo C después de secarse en el cloruro de calcio. Una vez llenos de aire seco la bola y el vástago, se retiraba el alambre de platino, teniendo cuidado de conservar en el vástago una pequeña columna de mercurio destinada á servir de índice.

Operación. — Entonces se colocaba el tubo en una caja de latón (fig. 567), haciendo pasar el vástago por un tapón adaptado á un tubo lateral, y conservando el tubo de cloruro de calcio para impedir nueva penetración de la humedad. Como la caja estaba primero llena de hielo machacado, el aire contenido en el depósito se contraía y el índice de mercurio adelantaba en el vástago desde B hacia A. Anotando la división del vástago donde se paraba el índice al quedar estacionario, se tenía el volumen de aire á cero contenido en el aparato. Cuanto á la presión del gas, el barómetro la indicaba en el momento de la experiencia. Por fin, retirando el hielo y reemplazán-

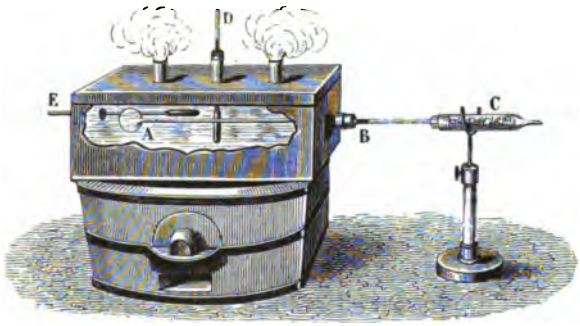


Fig. 567.

dolo por agua, se ponía la caja sobre un hornillo y se calentaba poco á poco; unos termómetros D, E, sumergidos en el baño indicaban las temperaturas sucesivas. Entonces el aire contenido en el aparato se calentaba lentamente, el índice se adelantaba desde A hasta B, y se cuidaba de hacer penetrar cada vez más el tubo en la caja, á medida que el índice tendía á salir de ésta, para que todo el aire estuviera á la temperatura del baño. Cuando se quería suspender la calefacción, se cerraban las puertas del hornillo : la temperatura quedaba estacionaria y el índice permanecía inmóvil algunos instantes. Entonces se tomaba nota de la división correspondiente del vástago, y de esta manera se tenía el volumen que había tomado el aire á la temperatura indicada por los termómetros, y á la presión barométrica del momento.

Cálculo de la experiencia. — Sean V el volumen del aire contenido en el aparato á cero, y V′ lo que ese volumen pasa á ser á la temperatura T del baño; V′ — V representa evidentemente el aumento total del volumen de aire V, cuando se calienta de cero á T grados. El aumento de volumen, para un solo grado y para una sola unidad de volumen es pues

$$[1] \qquad \frac{V' - V}{VT} = \alpha.$$

Observación. — Si la presión atmosférica ha cambiado, y si se tiene en cuenta la dilatación del vidrio, habría que efectuar correcciones. Sean H la presión á 0°, y H' la presión á T°; para referir el volumen V' á la presión H, hay que multiplicarlo por $\frac{H'}{H}$, y la fórmula anterior pasa á ser

$$\alpha = \frac{V' \frac{H'}{H} - V}{VT}.$$

Ahora bien, V' no es el volumen real del gas á t grados, sino el volumen aparente. El volumen real es V' (1 + KT), siendo K el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio. Llevando este valor á la fórmula, resulta por fin

$$[2] \qquad \alpha = \frac{V'(1 + KT)\frac{H'}{H} - V}{VT}.$$

Resultados generales. — Leyes de Gay-Lussac. — Gay-Lussac obtuvo los mismos resultados generales que Dalton. Se les enuncia con el nombre de *leyes de Gay-Lussac.*

1°. *Todos los gases se dilatan uniformemente entre* 0° *y* 100°;

2°. *Todos los gases tienen el mismo coeficiente de dilatación* (que es igual á 0,00375 ó $\frac{1}{267}$);

3°. *La dilatación de los gases es independiente de la presión exterior.*

Discusión de las experiencias de Gay-Lussac. — Rudberg, Regnault y Magnus han probado uno después de otro que ninguna de las leyes de Gay-Lussac es rigurosamente exacta. En particular, el número 0,00375 no representa en manera alguna el coeficiente de todos los gases.

La imperfeción de los resultatos de Gay-Lussac procede de dos causas de error inherentes á sus experiencias : 1°. el gas no estaba completamente seco; 2°. el índice de mercurio, que se movía en el tubo, no lo cerraba herméticamente, de manera que había comunicación entre el aire exterior y el interior del aparato. En los métodos empleados después de Gay-Lussac por Regnault y diversos experimentadores para medir la dilatación de los gases, se evitaron cuidadosamente estas causas de error.

568. **Fórmulas generales relativas á la dilatación de los gases.** — No obstante su falta de rigor, las leyes de Gay-Lussac se emplean de ordinario en la práctica, al mismo tiempo que la de Mariotte, cuando se trata de calcular las variaciones de volumen que experimenta una masa de gas cuya temperatura y presión varían dentro de límites poco extensos. He aquí los principales problemas de esta clase que puede ser necesario resolver.

I. *El volumen de un gas á* 0° *es* V_0; *¿ cuál sería su volumen V á t grados, siendo* α *el coeficiente de dilatación y constante la presión?*

Tiénese evidentemente

$$[1] \qquad V = V_0 (1 + \alpha t).$$

Recíprocamente, se tiene

[2] $$V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t}.$$

II. *Conociendo el volumen* V *de un gas á t grados, calcular su volumen V' á t' grados, siendo idéntica la presión.*

Primero se tiene el volumen á 0°

$$V_0 = \frac{V}{1 + \alpha t},$$

de donde se deduce el volumen á t'°

[3] $$V' = V_0 (1 + \alpha t') = V \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

III. *El volumen de un gas á t grados y á la presión H es V : ¿cuál será el volumen V' de la misma masa de gas á t' grados y bajo la presión* H' ?

Aquí hay que hacer dos correcciones, una relativa á la temperatura y la otra á la presión. Es indiferente empezar por una ú otra. Imaginemos primeramente que, *permaneciendo la temperatura en t°*, sólo la presión varía y se convierte en H' : sea V_1 el volumen que entonces tomará la masa de gas. Podemos aplicar aquí la ley de Mariotte, que da

[*a*] $$V_1 H' = VH, \qquad \text{de donde} \qquad V_1 = \frac{H}{H'}.$$

Supongamos ahora que, *permaneciendo la presión constante é igual á* H', varía la temperatura pasando á ser t' grados : sea V' el volumen que entonces tomará la masa del gas. Podemos aplicar la fórmula precedente [3] entre el estado final y el intermediario. Esta fórmula da

[*b*] $$V' = V_1 \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

Eliminando V_1, que es una incógnita auxiliar, entre las ecuaciones [a] y [b], resulta

[4] $$V' = V \frac{H}{H'} \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t},$$

lo cual puede escribirse

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \frac{V' H'}{1 + \alpha t'},$$

quiere decir

[4 *bis*] $$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \text{constante}.$$

Esto es lo que algunas veces se llama *ecuación de los gases perfectos.*

569. **Experiencias de Regnault: generalidades y resultados.** — Los resultados generales y los coeficientes numéricos relativos á la dilatación de los gases, que tanta autoridad tienen en la ciencia, se deben á los trabajos de Regnault. Éste empleó tres métodos de medición, y aunque no inventó ninguno, puede decirse que son suyos, á causa de los perfeccionamientos que introdujo.

Regnault midió en una primera serie de experiencias los *coeficientes medios de dilatación* de los gases entre 0° y 100°, *bajo presión constante*. Esto fué una repetición de las experiencias de Gay-Lussac. La presión constante bajo que hacía dilatarse los gases era primeramente de *una atmósfera*, como en los experimentos de Gay-Lussac; pero podía hacerla variar desde 380 milímetros de mercurio hasta 2620 mm.

En una segunda serie, Regnault midió las variaciones de presión que experimenta la masa del gas cuando se eleva su temperatura de 0° á 100°, pero *manteniendo constante su volumen*. De estas experiencias dedujo nuevos coeficientes medios, entre 0° y 100°, que por causa de su origen se designan con el nombre singular, pero clásico, de *coeficientes medios de dilatación* de los gases *bajo volumen constante*.

Por fin, en una tercera serie de experiencias, Regnault hizo variar al mismo tiempo el volumen y la presión de una masa de gas determinada, elevando su temperatura de 0° á 100°.

Los resultados principales de estas experiencias son los siguientes.

I. *Coeficientes de dilatación medios* entre 0° y 100° *bajo presión constante:*

Aire atmosférico	0,003672
Hidrógeno	0,003661
Ácido carbónico	0,003710
Ácido sulfuroso	0,003903

Se ve que el coeficiente medio del hidrógeno es más pequeño que el del aire, y que todos los demás son mayores; apartándose de él tanto más cuanto más próximos á su punto de liquefacción están los gases.

Además, estos coeficientes medios, medidos bajo diversas presiones, aumentan rápidamente á medida que las presiones suben. Este aumento es tanto más sensible cuanto más fáciles de reducir á líquido son los gases. Así resulta del cuadro siguiente:

PRESIONES	AIRE ATMOSFÉRICO	HIDRÓGENO	ÁCIDO CARBÓNICO	ÁCIDO SULFUROSO
360 mm	0,003650	—	—	—
760	0,003670	0,003661	0,003710	0,003902
980	—	—	—	0,003980
2520	—	—	0,003846	—
2545	—	0,003662	—	—
2565	0,003697	—	—	—
2620	0,003696	—	—	—

II. *Coeficientes de dilatación medios*, entre 0° y 100°, *dado volumen constante*. — El coeficiente medio de dilatación α_1 *dado volumen constante*, determinado tomando como presión inicial la atmosférica, *no es idéntico para todos los gases*. Así resulta del cuadro siguiente:

Aire atmosférico	0,003665
Hidrógeno	0,003667
Óxido de carbono	0,003667
Ácido carbónico	0,003688
Protóxido de nitrógeno	0,003676
Cianógeno	0,003829
Ácido sulfuroso	0,003845

Si se compara este cuadro con el anterior, obsérvase que los coeficientes α y α_1 son diferentes para un mismo gas; α_1 *es* generalmente *más pequeño que* α (excepto para el hidrógeno). Estas divergencias dependen de las faltas de concordancia que presentan las leyes de compresibilidad de estos gases respecto de la ley de Mariotte.

Además, el coeficiente α_1 va aumentando para un mismo gas, como el coeficiente α, cuando se aumenta el valor de la presión inicial. Así resulta del cuadro siguiente:

PRESIONES INICIALES	AIRE ATMOSFÉRICO	ÁCIDO CARBÓNICO
110 mm	0,003648	—
375	0,003759	—
758	—	0,003686
760	0,003665	—
1692	0,003680	—
1743	—	0.003752
3589	—	0,003860
3657	0,003709	—

570. **Experiencias de Regnault : Dilatación bajo presión constante.** — 1°. *Descripción del aparato.* — El matraz de Gay-Lussac A (fig. 568), provisto de un conducto lateral que permite hacer el vacío en él, ó introducir el gas á voluntad, y el *manómetro Regnault* MNR son las dos piezas principales del aparato de Regnault. El tubo MN del manómetro, así como el capilar que lo pone en comunicación con el matraz, se aforan y gradúan con cuidado : el volumen de cada una de sus partes es conocido. Una estufa de agua B permite elevar el matraz á la temperatura del agua hirviendo. Un cilindro envolvente L, por donde pueden circular de manera continua las aguas del servicio público, permite conservar las dos ramas del manómetro á temperatura constante. Por fin, la serie T de tubos en U, unidos con el cuello del matraz por mediación del tubo D en forma de T, sirve para introducir en el aparato gases perfectamente secos y puros.

2°. *Marcha de la operación.* — Se opera al principio á 0°; la estufa está llena de hielo fundente y el matraz con gas seco y puro. Los niveles del mercurio son llevados al mismo plano horizontal, M y L, en ambas ramas del manómetro. Tómase nota del volumen inicial ocupado por el gas, á saber, la cabida V del matraz y la v del tubo de unión y de la parte superior del manómetro, hasta M. También se apunta la presión atmosférica del momento H, así como la temperatura ambiente t (la suponemos diferente de θ, temperatura del agua que circula en torno del manómetro).

Después se calienta el matraz hasta T° en la estufa (temperatura del vapor de agua hirviendo). El gas se dilata, la presión aumenta al mismo tiempo que su

temperatura, y el nivel del mercurio sube en la rama mayor del manómetro. Entonces se deja salir mercurio, por medio de la llave de tres vías R, hasta que los dos niveles vuelvan á N, en el mismo plano horizontal. Al llegar aquí se toma

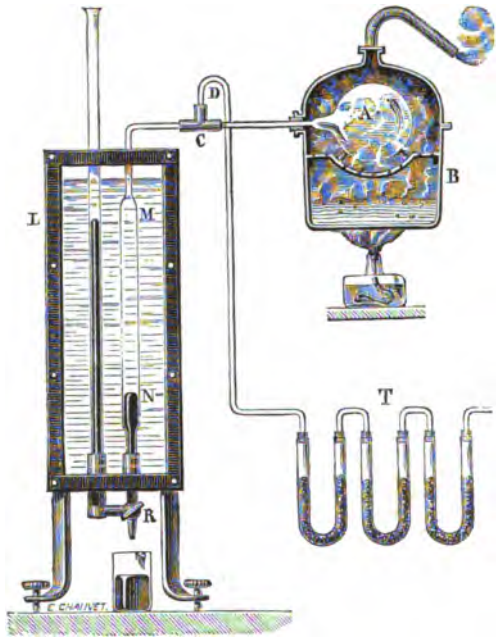


Fig. 568.

nota de la temperatura T de la estufa, de la presión exterior H' que puede ser un tanto distinta de H, así como de la temperatura ambiente t'; por fin, se mide con precisión el volumen u, igual á MN, que representa la dilatación del gas.

3°. *Cálculo del experimento.* — Se puede razonar de dos maneras para establecer la ecuación del experimento : ó bien se refiere á 0° el volumen total ocupado por el gas, en una ú otra de las fases del experimento; ó bien se puede aplicar directamente al gas, para cada una de estas fases, la fórmula de los gases perfectos (568, III). Contentémonos aquí de este último procedimiento. — Sean α el coeficiente desconocido del gas, y K el del vidrio.

En la primera fase se tienen dos masas de gas á la misma presión H pero á dos temperaturas diferentes 0° y t. Resulta pues

$$\frac{VH}{1} + \frac{vH}{1+\alpha t} \quad \text{ó} \quad \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H = \text{constante}.$$

En la segunda fase, se tienen las dos mismas masas de gas, á la misma presión H', pero á tres temperaturas distintas, T, t' y θ. Se tiene pues

$$\frac{V(1+KT)H'}{1+\alpha T} + \frac{vH'}{1+\alpha t} + \frac{uH'}{1+\alpha\theta} = \text{constante}.$$

Igualando los dos primeros miembros de estas expresiones, resulta

$$[1] \qquad \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H = \left[\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{u}{1+\alpha\theta}\right] H'.$$

Observemos que siendo H y H' muy poco distintas una de otra, la aplicación de la ley de Mariotte es en este caso perfectamente legítima.

4°. *Resolución de la ecuación.* — La incógnita α se encuentra en una ecuación que sería del *cuarto grado* ó por lo menos del *tercero* (si se desprecia la diferencia entre las temperaturas t y t'). No es, por tanto posible despejarla directamente. Regnault despejaba sus raíces, aplicando el método de las *aproximaciones sucesivas*. En la ecuación precedente despejaba el binomio $1 + \alpha T$. Tenía se

$$[2] \qquad 1 + \alpha T = \frac{H'(1 + KT)}{H + \frac{v}{V} \cdot \frac{H}{1 + \alpha t} - \frac{v}{V} \cdot \frac{H'}{1 + \alpha t'} - \frac{u}{V} \cdot \frac{H'}{1 + \alpha \theta}}.$$

Sirviéndose de un primer valor aproximado de α, por ejemplo del coeficiente de Gay-Lussac 0,00375 se calculaba primeramente el denominador del segundo miembro, lo que permitía obtener un primer valor aproximado del binomio $1 + \alpha T$, y por consiguiente de α. Sea α' este primer valor aproximado.

Sustituyendo este primer valor α' en el segundo miembro de la fórmula, será posible calcular un nuevo valor α'' más aproximado que el primero. Así se obtendrá una serie de valores α' α'', α'''..., cada vez más aproximados y más cercanos uno de otro. La operación terminará cuando la diferencia entre dos valores consecutivos de la serie sea de un orden de magnitud inferior al de los errores de experiencia probables.

5°. *Resultados.* — Los resultados de esta serie de experiencias han sido expuestos precedentemente (568, I).

571. **Experiencias de Regnault : Dilatación dado un volumen constante.** — Regnault estudió la dilatación de los gases *dado volumen constante*, — esto es, las *variaciones*

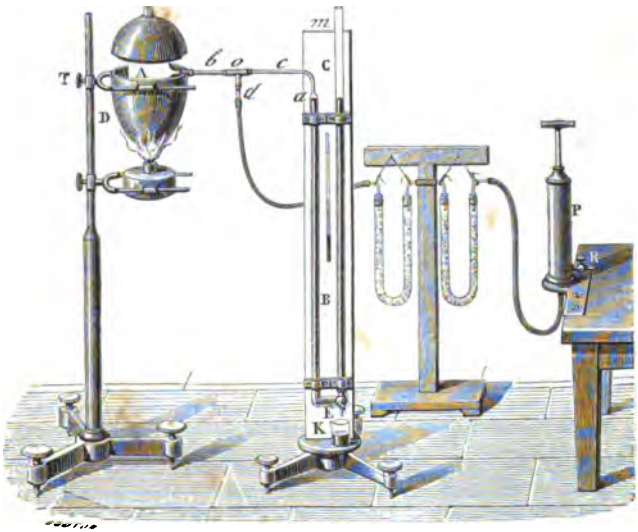


Fig. 569.

de presión que experimentan cuando se les calienta, *sin dejarlos dilatarse*, — por un método debido al físico sueco Rudberg.

1°. *Descripción del aparato.* — El gas está contenido en un matraz de vidrio A de cerca de un litro de capacidad (fig. 569). En el cuello del matraz se encuentra soldado un tubo de pequeño diámetro b, que va á penetrar en un gollete metálico de tres brazos o. En la segunda rama se encuentra masticado un tubo de vidrio d,

donde se adapta otro de goma elástica que pone al matraz en comunicación con tubos secadores y con una bomba de mano P; con el tercer brazo va á juntarse un tubo de vidrio *c* que se une con el mismo manómetro de aire libre BC descrito anteriormente. En *a*, sobre el tubo B, hay una marca de referencia á donde se tiene cuidado de llevar siempre el nivel del mercurio en ambos tubos (sea vertiendo por el tubo C ó dejando salir por la llave E).

El matraz A está dispuesto en una pequeña caldera de latón D, que sirve de estufa, y que se puede subir ó bajar más ó menos á lo largo de un montante vertical; fíjasele por medio de un tornillo de presión T; también se puede hacerlo deslizarse lateralmente sobre dos montantes horizontales para empalmar el tubo con el manómetro.

2°. *Marcha de las experiencias.* — *Manera de llenar el matraz.*— Primeramente se trata de llenar el matraz A de aire seco. Con tal fin se da vuelta á la llave E de modo que cierre la rama B del manómetro y después se lleva el matraz á la temperatura de 100° haciendo hervir por medio de una lámpara de alcohol agua introducida en la caldera. Entonces se cierra ésta con una tapadera doble, entre cuyas paredes circula el vapor antes de salir por un gollete colocado en el vértice. Después se hace el vacío gran número de veces valiéndose de la bomba de mano P, y se deja entrar cada vez el aire por los tubos secadores. Regnault repetía esta operación hasta 30 veces seguidas.

Primera fase. — Una vez lleno el matraz de aire seco, se retira el agua de la caldera, que se deja enfriar, y después se la llena de hielo machacado. Como el matraz se enfría hasta 0°. el gas se contrae y por los tubos penetra nueva cantidad de aire seco. El aire del matraz está entonces á 0°, el contenido en los tubos *bc* á la temperatura ambiente *t*, indicada por un termómetro adaptado al aparato, y el mercurio se encuentra al nivel *a* en los tubos; así las cosas, se retira el tubo de caucho y se cierra con la lámpara el tubo *d*. Al mismo tiempo se observa la presión H marcada por el barómetro: esta presión es la del aire que se acaba de encerrar en el aparato.

Segunda fase. — Retírase el hielo de la caldera y se echa en ella agua destilada que se hace hervir también, teniendo cuidado de dar vuelta á la llave E de modo que los tubos manométricos B y C comuniquen entonces entre sí. Como la fuerza elástica del aire en el aparato va aumentando con la temperatura, el nivel del mercurio tiende á bajar en el tubo B y á subir en el C; pero si se vierte gradualmente mercurio en éste, el exceso de presión que así resulta equilibra el aumento de la fuerza elástica del aire, y el nivel se mantiene constante en el brazo B, en el punto de referencia *a*. Cuando el gas cesa de dilatarse, se mide la altura del mercurio que se ha echado en el tubo C. Representándola por *h*, y por H′ la altura barométrica en el mismo momento, la masa de aire, que estaba primeramente á la presión H, se encuentra ahora á la presión $H' + h$. Cuanto á la temperatura final T del matraz, es igual á la del vapor en la caldera. Ahora bien, en las *tablas de las fuerzas elásticas del vapor de agua* se encuentran las temperaturas correspondientes á las presiones que ese vapor soporta. Basta pues con tomar la altura H′ del barómetro al fin de la experiencia, para deducir de ahí, mediante esas tablas, el valor de T.

3°. *Cálculo de la experiencia.* — Se aforan de antemano el matraz así como los tubos *b* y *c*: también se les pesa llenos de mercurio. Sean V la capacidad del matraz á 0°, *v* la de los tubos *b* y *c* á la temperatura ambiente *t* durante la primera parte de la experiencia, K el coeficiente de dilatación del vidrio, y α el del aire ó del gas ensayado. El volumen de aire *v* referido á 0° se convierte en $\frac{v}{1+\alpha t}$ (despreciando la dilatación del vidrio, lo que no altera el resultado, por ser *v* muy pequeño. De modo que el volumen total del aire en la primera fase de la experiencia es, pues, $V + \frac{v}{1+\alpha t}$, á 0° bajo la presión H.

Al fin de la segunda fase, estando el aire del matraz á T grados, su volumen es $V(1 + KT)$ por causa de la dilatación del vidrio: referido á 0°, este volumen de gas es $\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T}$. Cuanto al volumen *v*, suponiendo que la temperatura ambiente haya cambiado y se haya convertido en *t′*, es á 0°, $\frac{v}{1+\alpha t'}$. El volumen

total del aire á 0° y á la presión $H' + h$ es por tanto en el segundo caso

$$\frac{V(1 + KT)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha l'},$$

Ahora bien, se ha visto que para una misma masa de gas, á temperatura igual, el producto del volumen por la presión es constante. Tiénese pues la ecuación

$$\left\{ V \frac{1 + KT}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha l'} \right\} (H' + h) = \left(V + \frac{v}{1 + \alpha l} \right) H.$$

4°. *Cálculo y resultados.* — Esta ecuación ha sido resuelta, como la precedente por el método de las *aproximaciones sucesivas.* Ya hemos indicado (568, II) los resultados de esta serie de experiencias.

572. **Experiencias de Regnault : Dilatación dados volumen y presión variables.** — La dilatación de los gases en el caso de que varíen al mismo tiempo su volumen y su presión, ha sido estudiada por medio de un procedimiento de Dulong y Petit, que Regnault perfeccionó mucho.

1°. *Descripción del aparato y marcha de la experiencia.* — El aparato de Regnault se compone de un depósito de vidrio B (fig. 570), que *se afora* previamente con

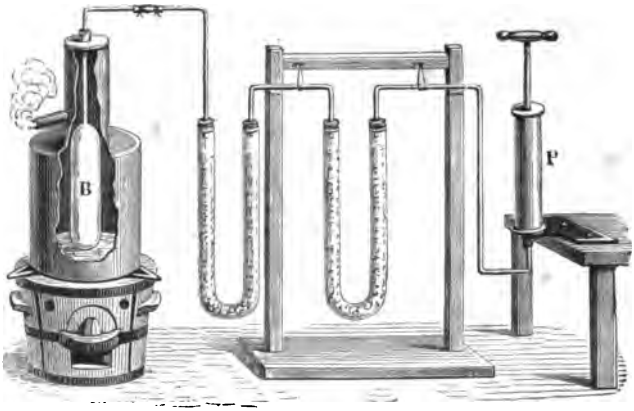


Fig. 570.

mercurio, y cuyo coeficiente de dilatación cúbica se determina de antemano. A depósito B se suelda un tubo de vidrio de pequeño diámetro.

Manera de llenar con aire seco. — Este depósito se llena de aire perfectamente seco, operando como en los experimentos anteriores (570).

Hecho así, se deja por espacio de media hora próximamente que el aire del depósito tome la temperatura del vapor, y después se retiran los tubos secantes, cerrando con la lámpara la extremidad del tubo capilar, y cuidando al mismo tiempo de apuntar la altura H del barómetro. Una vez frío el depósito B, se le coloca en un aparato (fig. 571) que permite rodearlo completamente de hielo, y se sumerge la extremidad del tubo en una cubeta C llena de mercurio. Cuando el depósito B está á cero, se rompe con unas pequeñas pinzas la punta b; como el aire interior se ha condensado, el mercurio de la cubeta penetra en el depósito por efecto de la presión atmosférica y se eleva á una altura oG tal que, agregada á la tensión del aire en el aparato, equilibra la presión atmosférica[1].

1. Para evitar que el aire, pasando por entre el mercurio y la pared exterior del tubo, sea arrastrado con el mercurio y penetre en el depósito, Regnault echaba sobre el mercurio de

La altura h de la columna de mercurio Go se mide *con el catetómetro*, utilizando la disposición de la punta de contacto *go*.

Finalmente se cierra la punta afilada b por medio de una pequeña cuchara a, que se ha llenado anticipadamente de cera blanda, y que se puede hacer avanzar á voluntad hacia la punta b hasta que ésta penetre en la cera y quede cerrada por completo. En este momento se toma nota de la presión indicada por el barómetro : representándola por H', la presión del aire en el depósito B queda expresada por $H' - h$.

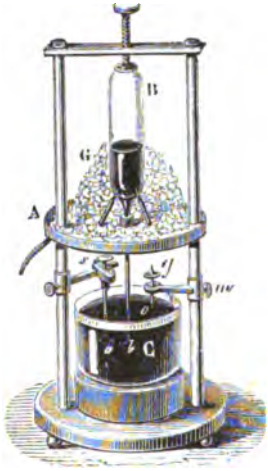


Fig. 571.

Tomadas estas medidas, se retira el depósito del hielo, se le enjuga y se le pesa para obtener el peso y por consiguiente el volumen del mercurio que en él se ha introducido; conocido este volumen, se deduce de ahí el del aire á cero.

2°. *Cálculo de la experiencia.* — Sean á 0° P el peso del mercurio que pasa al depósito y al tubo cuando se rompe la punta b, P' el peso del mercurio en ellos contenido, á 0°, cuando están llenos, D la densidad del mercurio, K el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio con que está hecho el depósito, y α el coeficiente de dilatación del aire ; sean además H' la altura del barómetro en el momento de taparse con la cera la punta b del tubo capilar, H la altura del barómetro cuando se cierra el aparato en la lámpara, y t la temperatura del depósito B en el mismo instante. La capacidad de este depósito y del tubo á 0° es $\frac{P'}{D}$, y á t grados $\frac{P'}{D}(1 + Kt)$. Tal era pues también el volumen de aire á t grados y bajo la presión H cuando se ha cerrado el aparato; vuelto á la presión 760, este volumen es por fin

$$[1] \qquad \frac{(P'(1 + Kt)H}{D \cdot 760}.$$

Por otra parte, el volumen de aire en el depósito enfriado á 0° es $\frac{P' - P}{D}$ á la presión $H' - h$. Á la presión 760 y á t grados este volumen se convierte en

$$[2] \qquad \frac{(P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h)}{D \cdot 760}.$$

Pero las fórmulas [1] y [2] representan ambas el volumen, á t grados y bajo la presión 760, del aire contenido en el depósito y en el tubo ; es, pues, posible igualarlos, lo que da, suprimiendo el denominador común, la ecuación

$$[3] \qquad P'(1 = Kt)H = (P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h),$$

de donde se deduce el valor de α.

573. **Experiencias de Amagat : Leyes generales.** — Los coeficientes bajo presión y volumen constante varían con la presión y la temperatura; he aquí las leyes resultantes de los trabajos de Amagat.

I. *Coeficiente bajo presión constante.* — 1°. *Variación con la temperatura.* — Los coeficientes bajo presión constante varían con los límites de temperatura á que se refieren : así resulta del cuadro siguiente :

la cubeta ligera capa de ácido sulfúrico é introducía la punta afilada b en pequeños discos de latón, taladrados en su centro. Como estos discos son mojados por el mercurio, que los ataca, cierran el paso al aire.

Ácido sulfuroso.		*Ácido carbónico.*	
De 10° á 60°	0,003904	De 0° á 50°	0,003714
10° á 100°	0,003863	0° á 100°	0,003711
10° á 150°	0,003832	0° á 150°	0,003706
10° á 200°	0,003812	0° á 200°	0,003704
10° á 250°	0,003798	0° á 250°	0,003703

Estos valores son referidos á las temperaturas del termómetro de aire. Las anteriores variaciones, lo mismo que las relativas á la presión, son tanto más considerables cuanto más fácilmente liquidables son los gases.

Cuando la presión crece, el coeficiente (á una temperatura ó entre límites dados), aumenta primeramente, pasa por un máximum, y después disminuye; este máximum se presenta bajo una presión tanto más fuerte cuanto más elevada es la temperatura.

(Por ejemplo, para el *ácido carbónico*, el máximum entre 40° y 50° (0,07566) ocurre bajo 90 atm., mientras que entre 100° y 137° (0,00945) se efectúa bajo 400 atm. Otro ejemplo : bajo 3000 atm., el coeficiente del hidrógeno entre 0° y 47° (0,00123) es casi tres veces más pequeño que bajo la presión normal : apenas resulta superior al del alcohol bajo esta misma presión).

2°. Cuando sube la temperatura, el coeficiente (para una presión dada) aumenta, pasa por un máximum y después disminuye; este máximum se realiza á una temperatura tanto más elevada cuanto mayor es la presión. Después de este máximum y á una temperatura suficientemente alta, el aumento de volumen es sensiblemente proporcional á la elevación de temperatura.

(Por ejemplo, para el ácido carbónico, el máximum bajo la presión de 100 atm. (0,05899) se efectúa entre 40° y 50°, mientras que bajo la presión de 250 atm. (0,00865) ocurre entre 90° y 100°).

Las leyes que determinan la posición de estos dos órdenes de máximum son más complicadas.

II. *Coeficientes de volumen constante.* — 1°. Si la presión aumenta, el coeficiente (entre límites dados de temperatura) crece y pasa por un máximum tanto menos pronunciado cuanto más elevada es la temperatura.

2°. Para temperaturas crecientes, el coeficiente está sensiblemente en razón de la presión media y por consiguiente disminuye continuamente.

Observación. — En estos enunciados, el coeficiente entre límites dados de temperatura, ó á una temperatura dada, se entiende en el sentido de la definición expuesta (n° 562, 1°) al hablar de la dilatación de los líquidos.

CAPÍTULO V

APLICACIONES DE LA DILATACIÓN DE LOS GASES.

TERMÓMETRO DE GAS. — TERMOMETRÍA DE PRECISIÓN. — DENSIDADES DE LOS GASES.

574. **Falta de comparabilidad de los diferentes termómetros.** — Todos los termómetros de líquidos ó de sólidos, cuyos puntos fijos 0° y 100° se han determinado, estarán siempre necesariamente *acordes* en estas dos temperaturas límites. Mas no hay razón para que ocurra lo mismo en todos los grados de la escala. Para que un termómetro de alcohol ó uno metálico indicara por ejemplo 20° en un medio en que el termómetro de mercurio marca 20°, sería preciso que el mercurio, el alcohol y el metal experimentaran en las mismas circunstancias, los $\frac{20}{100}$ de su dilatación total entre 0° y 100°, lo que no podría efectuarse sino en el caso de que los dos líquidos y el metal tuvieran exactamente la misma ley de dilatación. Ahora

bien, el estudio general de las dilataciones nos ha probado que dos cuerpos cualesquiera, sólidos, líquidos ó gaseosos, no obedecen nunca rigurosamente á la misma ley de dilatación. Por consiguiente, *la medida de una temperatura cualquiera, que no sea* 0^0 *y* 100^0, *sólo tendrá significación precisa en tanto cuanto se indique al mismo tiempo la naturaleza del termómetro que ha servido para apreciarla.*

575. — **Elección de la sustancia termométrica.** — *Termómetros de gas.* — Los gases tienen, como *sustancia termométrica*, evidente superioridad sobre los líquidos — y *a fortiori* sobre los sólidos — en lo relativo á la *sensibilidad*, puesto que su coeficiente de dilatación es mucho mayor. También les son superiores en lo que se refiere á *comparabilidad*. De esta magnitud misma de su coeficiente resulta que las pequeñas diferencias que existen entre las dilataciones de los diversos envolventes de vidrio son completamente despreciables. Por consiguiente, dos termómetros construídos con el mismo gas serán siempre *comparables entre sí*, sean cuales fueren las diferencias del vidrio de sus depósitos y vástagos, y un mismo termómetro de gas permanecerá siempre *comparable á sí mismo.*

De manera que para medir las temperaturas con precisión, lo que se debe escoger con preferencia es un gas y no un líquido ó un sólido.

576. **Principios de la termometría de precisión.** — Elijamos como cuerpo termométrico una masa gaseosa A, de naturaleza determinada, contenida en un recipiente de volumen *invariable*, y como *elemento termoscópico*, es decir, como factor variable con la temperatura, la fuerza elástica del gas.

Aquí no hay *ley física* que pueda servir de definición á esta medida; súplese el inconveniente relacionando la medida de la temperatura t con la de la fuerza elástica pt de la masa A por medio de una ecuación arbitraria.

Se ha elegido la más sencilla : la ecuación del primer grado entre p y t.

Digamos pues

$$pt = a + bt. \qquad [1]$$

En adelante, *la escala termométrica queda determinada :* es la *escala lineal.*

Pero se necesita además determinar las constantes a y b de la fórmula, quiere decir, el *sistema termométrico.* Hemos visto que se consigue, en el *sistema centígrado*, que es el más usado, designando convencionalmente por los números O y 100 los puntos fijos relativos á la fusión del hielo y á la ebullición del agua *bajo la presión normal.*

Si p_0 y p_{100} son las presiones correspondientes de la masa A, leídas en el manómetro, se tiene con arreglo á la ecuación [1],

$$p_0 = a. \qquad p_{100} = a + 100\,b, \qquad [2]$$

de donde se deduce

$$b = \frac{p_{100} - p_0}{100}$$

y por consiguiente

$$pt = p_0 + \frac{p_{100} - p_0}{100}\,t; \quad \text{de donde} \quad t = \frac{pt - p_0}{\frac{p_{100} - p_0}{100}}. \qquad [4]$$

[3]

La ecuación [4] indica que se toma como *unidad de temperatura* la variación de temperatura que lleva consigo una variación de presión $\frac{p_{100} - p_0}{100}$ en la masa gaseosa que *carga* el termómetro.

La ecuación [3] puede escribirse también

$$pt = p_0\left(1 + \frac{p_{100} - p_0}{100\,p_0}\,t\right) \quad \text{ó} \quad pt = p_0\,(1 + \beta\,t),$$

si admitimos que

$$\beta = \frac{p_{100} - p_0}{100\,p_0}$$

La constante β ha recibido el nombre de *coeficiente termométrico* del aparato.

Termómetro normal de la Oficina internacional de pesas y medidas. — El termómetro tipo, instalado en Sèvres, cerca de París (pabellón de Breteuil) por M. Cha-

puis, ha sido cargado de hidrógeno á 0° bajo la presión que corresponde á 1 metro de mercurio.

El coeficiente β de este termómetro es igual á 0,00366254.

El depósito de gas TT' (fig. 572), es un cilindro de platino que tiene 1038,99 cm³ de cabida á 0°. Está unido al manómetro *nn'* por un tubo de pequeño diámetro *t*.

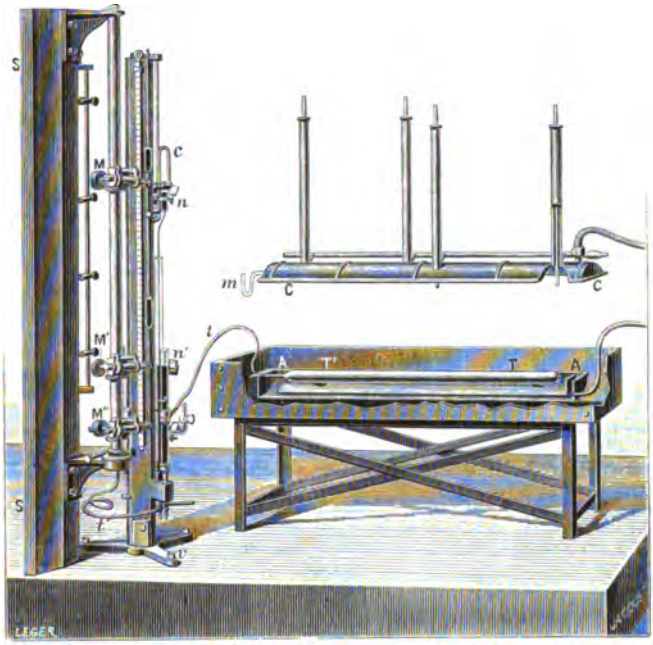


Fig. 572.

Las alturas del mercurio en el manómetro se examinan por medio de microscopios M, M', M'', como en un comparador.

Realmente, la *ecuación termométrica* [3] se complica algo aquí por la dilatación del recipiente y por la existencia de un *espacio perjudicial* constituído por el pequeño tubo que transmite la presión del gas al manómetro (fig. 572). Teniendo en cuenta estas condiciones, se tiene la ecuación completa

$$[3\ bis] \qquad \left(V_0 + \frac{v}{1+\beta t}\right) p_0 = \left[\frac{V_0\,(1+K_T)}{1+\beta\,T} + \frac{v'}{1+\beta\,t'}\right] p_T.$$

V_0 representa el volumen del recipiente á cero, v y v' los volúmenes del espacio perjudicial á las temperaturas ambientes t y t', K_T es la dilatación específica del recipiente para el intervalo de temperaturas $(t_T - T)°$.

Observación. — Del estudio de la dilatación de los gases resulta que termómetros cargados con cuerpos de esta clase diferentes, bajo presiones variables, son *comparables* también dentro de extensos límites; y permanecen siendo *comparables* consigo mismos, si se les consulta manteniendo la presión constante y tomando el volumen como elemento termoscópico.

577. **Termómetros de mercurio.** — Sustituyendo, según hicimos al principio el mercurio en vez del gas como cuerpo termométrico y la medida de la dilatación aparente en vez de la de una fuerza elástica, se han obtenido termómetros muy prácticos.

Entonces se define t por la ecuación

$$V_0 + nv_0 = a + bt,$$

siendo V_0 y v_0 los volúmenes en el hielo fundente del depósito y de la división del tubo graduado que lo corona : n expresa la última división ocupada por el mercurio cuando el instrumento se encuentra en el recinto dado.

En este caso se tiene para determinar los coeficientes a y b en el sistema centígrado

$$V_0 + n_0 v_0 = a, \qquad V_0 + n_{100} v_0 = a + 100\, b;$$

de donde

[4 *bis*] $$t = \frac{n}{\dfrac{n_{100} - n_0}{100}}.$$

La unidad de temperatura en este caso es la 100ª parte de la elevación de temperatura necesaria á la producción de la dilatación aparente $(n_{100} - n_0)v_0$.

578. **Comparación del termómetro de aire normal con el termómetro de mercurio normal.** — El termómetro de aire presenta un gran inconveniente desde el punto de vista práctico : es la dificultad y lo tardío de las manipulaciones que cada operación exige. Así es que no obstante su precisión se le usa en la práctica mucho menos que el *termómetro de mercurio*. Este es el verdadero *termómetro normal usual*.

Las indicaciones de los dos termómetros son independientes *a priori*. Sin embargo, ocurre que los termómetros de mercurio convenientemente consultados no sólo son sensiblemente comparables entre sí, sino también con el normal (termómetro de gas consultado á presión constante).

Ambos corresponden al mismo grado : el grado centígrado, *nueva unidad fundamental* que debe colocarse al lado del centímetro, del gramo y del segundo en el sistema C. G. S. De esta manera se aplica también éste á las magnitudes termométricas.

Definido claramente el grado de este modo, ha sido posible estudiar los problemas antes planteados, quiere decir, el estudio de las leyes que enlazan una longitud, un volumen, una fuerza elástica, etc., con la temperatura.

DENSIDAD DE LOS GASES.

579. **Definición. — Método general de determinación.** — Se llama densidad de un gas á la *relación que existe* entre el peso de un volumen dado de este gas, y otro análogo de aire, estando ambos cuerpos á la temperatura de 0° C y bajo la presión de 76 centímetros.

Para medir la densidad de un gas se tomará un matraz de vidrio de 8 á 10 litros de cabida, cuyo gollete esté provisto de una llave que se puede atornillar en la máquina neumática. Pésase este matraz sucesivamente vacío, lleno de aire y lleno del gas cuya densidad se busca, estando aire y gas puros y secos. Restando del peso obtenido en las dos últimas pesadas el del matraz, se tendrá el peso del aire y el del gas bajo el mismo volumen.

Si la temperatura permaneciera constantemente igual á 0° y la presión á 76 centímetros durante estas diversas pesadas, sólo habría que dividir el peso del gas por el del aire, y el cociente sería la densidad buscada. Pero como estas condiciones de temperatura y de presión no se realizan de ordinario mientras duran las experiencias, es necesario efectuar varias correcciones para referir el peso de los dos gases á las condiciones normales de temperatura y de presión.

Así lo hicieron Dumas y Boussingault, que fueron los primeros en aplicar este método general.

580. **Método de Regnault.** — Sea cual fuere el cuidado que se tenga en estas correcciones, no dejan de ser inciertas. Regnault perfeccionó el procedimiento operando en condiciones experimentales que suprimían la mayor parte de las causas de error y hacían las correcciones inútiles.

Empleo del matraz compensador ó matraz-tara. — Tómanse dos matraces de largo cuello, hechos con el mismo vidrio y que tengan volúmenee exteriores *sensiblemente iguales;* después se cierra el mayor por medio de un gollete de llave, y el menor por un sencillo gollete de garfio. Para averiguar si los volúmenes de los matraces son idénticos, se les llena de agua, suspendiéndolos de los platillos de una balanza, cuidando de equilibrar por medio de una tara. Si después se les introduce en una cuba llena de agua, el equilibrio queda generalmente roto y el número de gramos q que precisa añadir para restablecerlo, representa, en centímetros cúbicos, la diferencia de los volúmenes de los matraces. Entonces se prepara un tubo de vidrio cerrado cuyo volumen exterior sea de q centímetros y se le suspende del garfio del matraz pequeño.

Manera de llenar el matraz á 0°. — Á fin, de evitar las correcciones de dilatación del vidrio y de los gases con que se experimenta, se tiene cuidado de llenar el matraz de llave, sea de gas, sea de aire á cero. Para ello se le coloca en un vaso lleno de hielo (fig. 573); después se atornilla en la llave B otra llave A, por me-

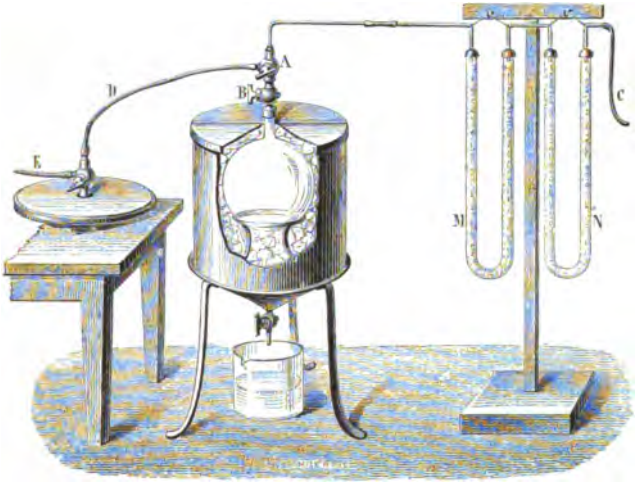


Fig. 573.

dio de la cual se puede poner el matraz á voluntad en comunicación sea con una máquina neumática, valiéndose de un tubo de caucho D, sea con los tubos M, N, á donde el gas se dirige por un tubo C. Los tubos M, N, contienen diferentes sustancias, destinadas, unas á secar el gas y otras á purificarlo.

Después de llenar una primera vez, se hace el vacío en el matraz, y luego se le llena de nuevo, y esto varias veces seguidas, hasta tener la seguridad de no dejar sino gas perfectamente puro.

Tara y pesada de los gases. — Entonces se cierra la llave B, y destornillando la llave A, se retira el matraz del hielo, se le enjuga con cuidado, se le deja po

nerse poco á poco á la temperatura ambiente, de modo que ya no condense vapor de agua en sus paredes, y después se le lleva á la balanza descrita arriba y se hace su tara sirviéndose del *matraz compensador*. Después se lleva de nuevo el matraz al hielo y se hace el vacío en él lo más completamente posible. Sólo queda escaso residuo gaseoso, á la presión h, que se lee en un barómetro diferencial, puesto en comunicación con el aparato por el tubo E y se le vuelve á poner en el mismo platillo de la balanza. El fiel se inclina en este momento hacia el lado opuesto y para restablecer el equilibrio hay que añadir al platillo un peso p. Este peso representa evidentemente el del gas contenido en el matraz, á 0^0 y bajo lo presión $H - h$.

Cálculo de la experiencia. — Para determinar el peso G que tendría un mismo volumen de este gas á la presión 760, se tiene, según la ley de Mariotte,

$$\frac{G}{p} = \frac{760}{H - h}, \quad \text{de donde} \quad G = p \times \frac{760}{H - h}.$$

Repítense las mismas pesadas con el aire, en el mismo matraz : hállase que el peso del aire, contenido allí á 0^0 y bajo la presión 760, está dado, en función del peso p', determinado directamente, por la misma fórmula

$$A = p' \times \frac{760}{H' - h'}.$$

Si se divide el peso del gas por el del aire, se obtiene la densidad buscada

$$D = \frac{G}{A} = \frac{p}{p'} \times \frac{H' - h'}{H - h}.$$

581. **Densidad de los gases que atacan el cobre.** — Para los gases que atacan el cobre, como el cloro, se toma un frasco tapado al esmeril, cuya cabida se determina de antemano aforándolo con agua (fig. 574). Se le llena del gas puro y seco por simple desalojamiento del aire. Entonces se calcula por una doble pesada el exceso $P - p$ del peso del gas sobre el del aire á volumen igual. Ahora bien, una vez conocida la capacidad del frasco se deduce de ahí el peso del aire que contiene, y este peso, agregado á la diferencia $P - p$, es el del gas. Sólo falta, por tanto, dividir este peso por el del aire, teniendo sin embargo cuidado de efectuar las correcciones de temperatura y de presión necesarias para referirlos ambos al mismo volumen, á la temperatura de 0^0 y bajo la presión de 76 cm.

Fig. 574.

582. **Nuevas experiencias de M. A. Leduc.** — M. A. Leduc ha repetido recientemente todas las medidas de Regnault relativas á la densidad de los gases, simplificando su método á la vez que introducía en él los perfeccionamientos siguientes :

1°. Medida de la presión atmosférica y de la presión residuo por medio de aparatos perfeccionados (178).

2°. Pesadas al *décimo de miligramo* por medio de la balanza Collot (92); lo que le ha permitido reducir de 10 á 2 litros las dimensiones del matraz de gas.

3ª. Empleo de un matraz de vidrio y de *llave de vidrio* (fig. 575) sin armadura metálica ni mástic (fácil es comprender los inconvenientes de esta sustancia). Este nuevo matraz permite determinar la densidad del cloro y de los gases ácidos lo mismo que la de los gases neutros.

4ª. Hecho el vacío con una máquina de mercurio, se tara sucesivamente el matraz vacío y después lleno de gas y vacío de nuevo : de esta manera se eliminan la influencia de las pérdidas de peso del matraz debidas á las secadas sucesivas.

5ª. Por fin, M. Leduc tiene en cuenta la ligera contracción que experimenta el matraz cuando se hace el vacío en él, lo cual corresponde á una disminución del empuje atmosférico de 0,2 mmg por litro próximamente.

Por este método halló cifras esencialmente distintas de las admitidas hasta hoy :

Oxígeno.	1,1050	Nitrógeno.	0,9720
Hidrógeno.	0,06947	Protóxido de nitrógeno.	1,0387

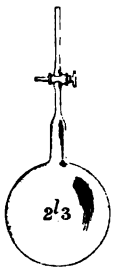


Fig. 575.

583. **Determinación del peso del litro de aire normal.** — *Método de Regnault.* — Después de haber determinado el peso de aire A que llena el matraz á 0° y bajo la presión normal, sólo faltaba por determinar el volumen V de este matraz para deducir de estos dos números, por la fórmula $a_0 = \frac{A}{V}$, el peso del litro de aire normal. Regnault efectuó esta última medida por medio de un *aforo con agua destilada.*

Primero hacia la tara del matraz, lleno de agua destilada á 0°. Sea M el peso de esta agua, B el del vidrio y ω el empuje : la ecuación de este primer equilibrio era

$$\text{tara} = B + M - \omega.$$

Después de haber vaciado el matraz y de llenarlo de aire seco, á la temperatura de 0° y bajo la presión actual H', volvía á colocarlo en el platillo de la balanza. El fiel se inclina al otro lado y, para restablecer el equilibrio hay que agregar por la parte del matraz, pesos conocidos P. La nueva ecuación de equilibrio era

$$\text{tara} = B + A' + P - \omega'.$$

Restando las dos ecuaciones miembro á miembro, resulta

$$M - \omega - P - A' + \omega' = 0.$$

P se obtiene directamente por la experiencia ; A' es el peso de un volumen de aire igual al del matraz á 0° y bajo la presión H' : se le deduce del peso A (determinado precedentemente) por la ecuación $A' = A \frac{H'}{760}$; por fin $\omega' - \omega$ es la diferencia de los empujes sufridos por el matraz en las dos pesadas : es despreciable respecto del peso del matraz lleno de agua. Tiénese en fin la ecuación

$$M = P + A \frac{H'}{760}.$$

Ahora bien $M = Ve_0$, llamando e_0 al peso específico del agua pura á 0° : de ahí se deduce V, y por consiguiente a_0.

Regnault averiguó además que *el peso de un litro de aire seco, á 0° y bajo la presión normal de 76 centímetros, es igual á* 1,2932 g. Esta determinación se hizo en París, esto es á la latitud de 48°50'14" y á la altura del Colegio de Francia, que es de 60 metros sobre el nivel del mar. De ahí se puede deducir el peso del litro de aire (en las condiciones normales de temperatura y de presión) *en otro punto del*

globo, sirviéndose de las fórmulas de corrección relativas á la variación de g (69).

Observación. — Conociendo el peso del litro de aire normal y la densidad de un gas, se puede calcular el peso P de un volumen V de este gas en las condiciones normales de temperatura y de presión. Tiénese $P = V a_0 d$, pues el producto $a_0 d$ representa, *por definición*, el peso normal del litro de este gas.

CAPÍTULO VI

CAMBIOS DE ESTADO DE LOS CUERPOS.

FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN.

584. **Leyes de la fusión.** — *Enunciado.* — El fenómeno de la fusión de los cuerpos, que hemos definido poco hace, está sometido á dos leyes experimentales.

1°. *Dada una presión constante, todo cuerpo entra en fusión á una temperatura determinada é invariable para cada sustancia; esa temperatura se llama su punto de fusión.*

2°. *Desde que empieza la fusión de un cuerpo, la temperatura deja de subir y permanece igual al punto de fusión hasta que aquélla sea completa.*

Demostración. — Las leyes de la fusión se demuestran por los procedimientos mismos que sirven para determinar exactamente los puntos de fusión.

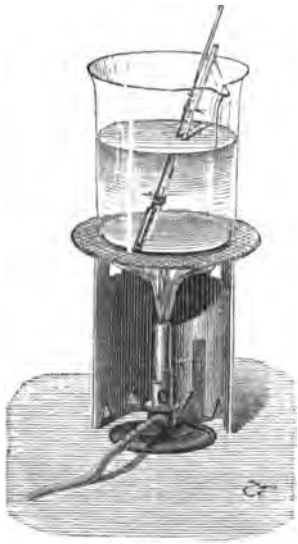


Fig. 576.

Caso general. — El caso más sencillo es aquel en que se dispone de una masa notable del cuerpo que se trata de examinar. Caliéntasele directamente en un vaso de vidrio de Bohemia (fig. 576) y se introduce el depósito de un termómetro (bien calibrado y exacto) en la sustancia que se funde. Tómase nota del punto de parada de la columna mientras dura el cambio de estado, y se observa : 1°. que este punto de parada es siempre el mismo para una sustancia dada, químicamente definida; es el *punto de fusión;* 2°. que este punto de parada es

constante mientras quedan sin fundir partículas de la sustancia.

Si durante la observación del punto de parada se tiene cuidado de agitar las capas que permanecen líquidas, y si se efectúa la corrección de temperatura relativa á la porción del vástago del termómetro no sumergida, se obtiene el punto real de fusión.

Casos particulares. — Cuando sólo se tiene escasa cantidad de sustancia hay que proceder de otro modo. Introdúcense algunos miligramos de ella en un tubo afilado, casi capilar y de paredes delgadas, y se tiene cuidado de establecer el contacto del cuerpo con la pared interna del tubo por una fusión previa seguida de enfriamiento. El tubo así preparado se fija en el vástago de un termómetro, de modo que la bola de éste quede á la altura de la masa solidificada, y se introduce todo el sistema en un vaso de vidrio de Bohemia que contiene *agua, parafina blanca ó aceite de almendras dulces*, según la temperatura que se trata de alcanzar. Caliéntase gradualmente, agitando poco á poco el líquido con el sistema, y se observa el punto en que la masa concrecionada se liquida y se vuelve transparente. Esta temperatura da el punto de fusión, una vez corregida del error que se debe á la emersión de parte del vástago.

Observación. — Tratándose de ciertos cuerpos que se ablandan antes de fundirse y que pasan por un estado pastoso antes de llegar al estado líquido, no es posible determinar con exactitud el punto de fusión. Así ocurre por ejemplo cor los vidrios de diferentes especies, cuya fusibilidad es muy variable con su composición.

585. **Calor de fusión : trabajo consumado.** — Según la segunda ley, la temperatura de un cuerpo en fusión permanece constante mientras dura el fenómeno, y esto sea cual fuere le intensidad del foco calorífico. Todo el calor comunicado durante la fusión desaparece pues como calor sensible ; de donde se deduce que es consumido por el trabajo interno necesario para obtener el estado molecular que constituye la fluidez.

Si se mezclara primeramente 1 kilogramo de agua á 0° con el mismo peso de ese líquido á 79°, se tendrían inmediatamente 2 kilogramos de agua á 39°,5, temperatura media entre las de los dos líquidos mezclados. Pero si se mezcla un kilogramo de hielo machacado con un peso igual de agua á 79°, el hielo se funde en seguida, y se obtienen 2 kilogramos de agua á 0°. Por esto se vé que, sin cambiar de temperatura, y únicamente para fundirse, un kilogramo de hielo absorbe la cantidad de calor que se necesitaría para elevar de 0° á 79° 1 kilogramo de agua. De manera que esta cantidad de calor representa el *calor de fusión* del hielo.

Definición. — En general, la cantidad de calor necesaria para fundir la *unidad de peso* de un sólido, *sin elevación de temperatura*, es lo que se llama propiamente su *calor de fusión*.

Cada sustancia tiene un calor de fusión proprio, que se puede determinar por la experiencia.

586. **Fusión acuosa ó Disolución.** — Un cuerpo *se disuelve* cuando se liquida por efecto de la afinidad que se ejerce entre sus moléculas y las de un líquido. La goma arábiga, el azúcar, la mayor parte de las sales se disuelven en el agua. Este fenómeno es evidentemente un paso del estado sólido al líquido, un nuevo modo de fusión. Llámasele sea *fusión acuosa*, — por oposición á la *fusión seca* ó *fusión ígnea*, — sea más comunmente *disolución*.

Calor absorbido por la disolución. — Durante la disolución desaparece cantidad más ó menos grande de calor, lo mismo que en la fusión. Por esto la disolución de una sal produce generalmente un descenso de temperatura.

Sin embargo, en ciertas disoluciones se eleva la temperatura en vez de bajar. Esto depende de que en tal caso la disolución propiamente dicha viene acompañada de la combinación del cuerpo disuelto con el líquido, fenómeno químico que se efectúa con desprendimiento de calor. Por consiguiente, según que uno de los dos efectos predomina, ó según que sean iguales, así habrá producción de frío ó de calor, ó mantenimiento de la temperatura inicial.

587. **Solidificación : definición y leyes.** — Hemos visto que la *solidificación* es el paso del estado líquido al sólido. Este fenómeno se encuentra sometido á dos leyes, que son recíprocas de las de la fusión y que se demuestran de la misma manera.

1°. *La solidificación se produce para cada cuerpo á una temperatura fija, que es precisamente la de fusión.*

Esta ley es general ; sin embargo, presenta algunas excepciones aparentes, debidas á varias causas que pueden bajar el punto de solificación.

Fig. 577.

2°. *Desde el momento en que empieza la solidificación hasta que termina completamente, la temperatura permanece constante.*

La experiencia prueba que el calor que vuelve á hacerse sensible durante la solidificación es rigurosamente igual al que desaparece durante la fusión.

588. **Cristalización.** — En general los cuerpos que pasan *lentamente* del estado líquido al sólido afectan formas geométricas determinadas (tetraedros ó cubos, prismas, romboedros, etc.) que se llaman *cristales*

Si el que se solidifica es un cuerpo de fusión ígnea como el azufre ó el bismuto, se dice que la cristalización se opera por *vía seca;* pero si está disuelto en un líquido, la cristalización se efectúa por *vía húmeda.* Para que las sales disueltas en los líquidos cristalicen, hay que dejarlos evaporarse. La nieve, el hielo naciente, las sales, nos presentan numerosos ejemplos de cristalización. Los copos de nieve se reunen en figuras de simetría particularmente notable. El alumbre ofrece también un hermoso ejemplo de cristalización (fig. 577).

589. **Formación del hielo. — Flores de hielo : experiencia de Tyndall.** — Sábese que el agua *se congela* á 0°, tomando entonces el nombre de *hielo.*

El hielo tiene tendencia á cristalizar que se manifiesta en las formas de helechos arborescentes observadas en las vidrieras durante los fríos del invierno, cuando el vapor de agua se congela en ellas. La estructura cristalina no es aparente en un trozo de hielo por causa del cruzamiento y soldadura de los cristales unos con otros. Pero si se hace que un haz de rayos solares atraviese un pedazo de esa sustancia, como lo efectuó Tyndall, el calor *descristaliza* en cierto modo la masa interior y desagrega los elementos cristalinos que la constituyen : entonces son visibles por proyección. La figura 578 indica la manera de disponer el experimento de Tyndall, é indica al mismo tiempo apariencias proyectadas sucesivamente sobre la pantalla. Dáseles el nombre de *flores de hielo.*

Fig. 578.

590. **Cambios de volumen debidos á los cambios de estado físico. — Fuerza expansiva del hielo.** — El agua al enfriarse no se contrae más que hasta la temperatura de 4 grados y á partir de este momento se dilata hasta 0°. Ahora bien, este aumento de volumen crece más todavía en el momento de la congelación, y el hielo no tiene más que una densidad igual á 0,930 : por esto flota en la superficie del agua.

Al formarse el hielo desarrolla fuerza expansiva considerable, que hace reventar los vasos donde está. Las *piedras peladas* se rompen en los grandes fríos porque el agua que penetra en sus poros y grietas se dilata al congelarse.

Al hablar de este punto se cita con frecuencia el *experimento del comandante Williams,* que expuso al aire libre, varios grados bajo cero, dos bombas llenas de agua después de cerrar bien el oído por medio de un tapón de palo. En el momento de la congelación saltó éste yendo á parar muy lejos y al mismo tiempo

se acumuló el hielo en torno del orificio (fig. 579). El tapón de la otra bomba resistió, pero reventando ella.

El agua no es la única sustancia que aumenta de volumen al solidificarse. El hierro colado, el bismuto, el antimonio, presentan el

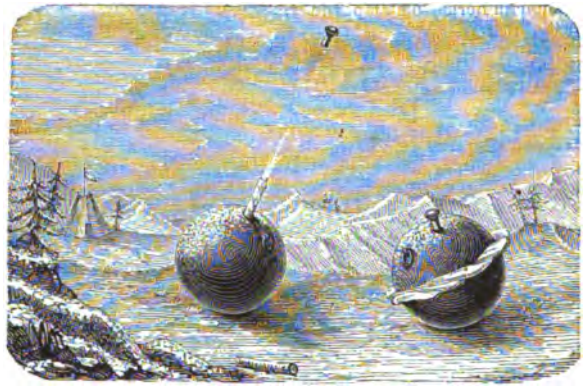


Fig. 579.

mismo fenómeno. En general, las demás sustancias, como el mercurio, el fósforo, el azufre, la estearina y la cera, se contraen en el momento de la solidificación.

591. **Excepciones á las leyes de la fusión y de la solidificación: Influencia de la presión exterior.** — Cuando la *presión exterior* es muy intensa puede producir un cambio sensible en la temperatura de fusión ó de solidificación, ya elevándola, ya bajándola.

I. *Efectos generales de la variación de presión.* — Para los cuerpos que *se dilatan* pasando del estado sólido al líquido y que *se contraen* en el paso inverso, — que es el caso más general, — la presión exterior es un obstáculo al aumento de volumen y facilita la contracción : en consecuencia, el aumento de presión exterior debe ser causa de una elevación de la temperatura de fusión y de un descenso de la temperatura de solidificación.

Por el contrario, tratándose de las sustancias que *se contraen* al pasar del estado sólido al líquido, y que *se dilatan* en el paso inverso, la presión exterior debe tener efectos opuestos; favorece la solidificación y se opone á la fusión : en consecuencia hará bajar la temperatura de fusión y elevará la de solidificación.

Ciertas consideraciones teóricas indujeron hace ya mucho tiempo á James Thomson, de Edimburgo, á admitir esa doctrina que fué confirmada por experimentos directos de Bunsen, de lord Kelvin y de Amagat.

II. *Demostración experimental.* — 1°. *Experiencias de Bunsen.* — Bunsen puso de manifiesto el *retraso* de la fusión por el aumento de presión (fig. 580).

Tomó un sencillo tubo doblemente encorvado, análogo á una especie de barómetro de sifón, que cerró por sus dos extremos, después de haber introducido en él la sustancia examinada desde *e* hasta *f*, mercurio desde *f* hasta *b* y aire desde *b* hasta *a*. El aparato se calienta en un baño por su parte inferior; el mercurio se calienta al mismo tiempo que la sustancia; la dilatación de este metal comprime el aire, cuya fuerza elástica reacciona sobre la sustancia y la somete á presión creciente. En el momento de la fusión, se toma nota por una parte de la temperatura del baño, y por otra del volumen ocupado por la masa de aire *ab*, de donde se deduce la presión.

Bunsen operó con el blanco de ballena ó espermaceti y con la parafina. He aquí algunos de los resultados que obtuvo :

Blanco de ballena.	Presiones	1^{atm}	96^{atm}	156^{atm}
	Temperaturas de fusión.	47°,7	49°,9	50°,9
Parafina	Presiones	1^{atm}	85^{atm}	100^{atm}
	Temperatura de fusión.	46°,3	48°,9	49°,9

2°. *Experiencias de lord Kelvin* (*Sir W. Thomson*). — Lord Kelvin ha probado al contrario la *aceleración de la fusión* por el aumento de presión.

Operó con el hielo, que comprimía en una especie de *piezómetro*.

Así observó que el punto de fusión se eleva de una manera continua desde 0° hasta 0,129° cuando la presión aumenta desde 1 atm. hasta 16 atm.; de consiguiente la fusión *se adelanta* á medida que la presión *crece*.

3°. *Experiencia de Mousson*. — La *fusión del hielo* por la compresión y la *congelación del agua* por la decompresión se ponen de manifiesto, aunque sin medirlas, por la experiencia siguiente, que se debe á Mousson :

El aparato se compone de un tubo de acero muy grueso (fig. 581), que se cierra en su parte inferior por medio de un tapón de tornillo y en la superior con una especie de émbolo de inmersión y e tornillo. Llénase el tubo de agua, y se introduce en él una bola de metal antes de cerrarlo, después de lo cual se le vuelve de manera que la bola cae, yendo á descansar sobre la base del émbolo; una vez así se le introduce en una mezcla frigorífica : el agua se congela y mantiene sólidamente la bola contra la punta del tornillo. Entonces se da vueltas á éste, haciéndolo penetrar en el cilindro de acero y ejerciendo de este modo sobre el trozo de hielo una presión creciente que puede subir á *muchos miles de atmósferas*. Si entonces se destapa el aparato, encuéntrase en él un trozo de hielo, y entre el hielo y el tapón de tornillo la bola metálica.

Fig. 580.

Fig. 581.

Precisa admitir forzosamente que la presión ha hecho fundirse el hielo, que la bola cayó entonces á través del líquido, y que éste ha vuelto á congelarse en un trozo sólido en el momento de la decompresión.

592. **Solidificación de los líquidos por la presión. — Experiencias de Amagat.** — Amagat obtuvo la solidificación propiamente dicha de varios líquidos por medio de la presión, valiéndose de un aparato especial.

El líquido, contenido en un cilindro de acero recibe la presión por medio del mercurio; el cilindro lleva en el mismo eje, uno frente á otro, dos miradores muy resistentes formados por dos pequeños cilindros de cuarzo; un haz luminoso atraviesa esos miradores, y va á incidir sobre un anteojo que permite observar el fenómeno de la solidificación.

Varios cuerpos toman, al solidificarse en estas condiciones, una forma crista-

lina perfectamente definida; los cristales que van á depositarse en la cara interna de los miradores pueden ser proyectados y fotografiados. La figura 582 es la

Fig. 582.

reproducción de fotografías obtenidas de esta manera por Amagat con el cloruro de carbono, desconocido hasta entonces en estado sólido, bajo presiones que llegaban á 1200 atmósferas.

Con el agua produjo Amagat el fenómeno inverso; el líquido congelado se

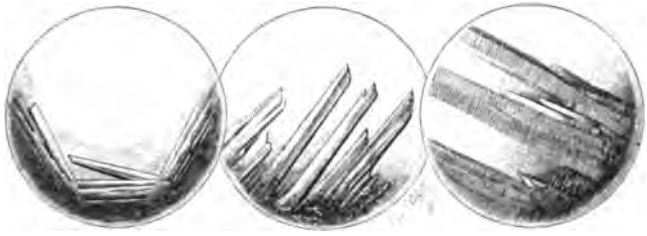


Fig. 583.

liquida bajo la presión, formándose cristales cuando se afloja lentamente (fig. 583).

Por los movimientos de los cristales se puede observar el hecho no menos instructivo de que en este último caso los cristales son más ligeros que el agua líquida, mientras que ocurre lo contrario si se les obtiene por compresión: entonces son más pesados que la parte líquida no solidificada todavía.

Estos experimentos no son únicamente cualitativos, pues permiten determinar la presión bajo que se produce el cambio de estado á cada temperatura; así el cloruro de carbono se solidifica

á — 19°,5	bajo una	presión de	210	atm.
0°	—	—	620	—
10°	—	—	900	—
19°,5	—	—	1160	—

593. **Rehielo.** — El *rehielo* es un fenómeno que pone en evidencia la influencia de la presión sobre el descenso del punto de solidificación del agua. He aquí cómo se puede realizarlo: dos pedazos de hielo se sueldan uno con otro desde que se les pone en contacto, aun cuando floten en agua bastante caliente para que no sea posible introducir en ella la mano.

Experiencia de Tyndall. — Gracias á esta propiedad se puede moldear una masa dada de hielo, en la forma que se quiera, sometién-

dola á presión más ó menos grande. Por ejemplo, si se la comprime entre dos moldes hemisféricos, hay primero ruptura en fragmentos más pequeños, que en seguida se sueldan unos con otros; cuando

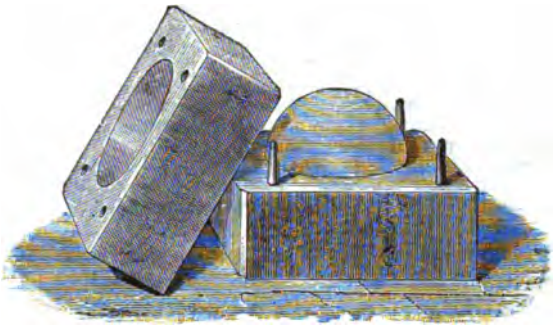


Fig. 584.

la presión aumenta, hay de nuevo fractura en partes todavía más pequeñas, y después rehielo; y así sucesivamente hasta que se llega, si la presión es suficiente, á formar una bola de hielo compacta y translúcida (fig. 584).

El mismo resultado puede obtenerse comprimiendo en el mismo molde una cantidad suficiente de nieve.

Formación de los ventisqueros. — Tyndall ha expuesto acerca de la formación de los ventisqueros en los Alpes una teoría que se funda en el moldeado del hielo por presión. Según este físico, la aparente *plasticidad* que resulta del rehielo, unida al arrastre efecto de la gravedad, explica la progresión continua de los ríos de hielo, desde las regiones elevadas donde se forman por la aglomeración de las capas de *nevado* hasta el fondo de los valles donde se funden, dando origen á torrentes de lodo.

594. **Excepciones á las leyes de la solidificación: Sobrefusión.** — Llámase *sobrefusión* al fenómeno del descenso del punto de solidificación de los líquidos por bajo de su temperatura normal de solidificación.

Se le ha observado primero en el agua, y ya hemos presentado algunos ejemplos de él; pero también se produce en otros muchos líquidos.

1°. *Experiencias de Gay-Lussac. — Basta que el agua esté purgada de aire y completamente inmóvil para que su punto de congelación baje varios grados.* En efecto, Gay-Lussac puso una probeta de agua destilada en una mezcla frigorífica y habiendo colocado todo debajo del recipiente de la máquina neumática, á fin de que el aire disuelto se desprendiese, el agua descendió hasta por bajo de — 12° *sin solidificarse.* Pero al imprimir á la masa entonces ligerísima secudida, la congelación sobrevenía inmediatamente, á la vez que la masa líquida volvía á subir á cero.

2°. *Experiencias de M. Gernez.* — M. Gernez efectuó sobre este interesante punto multitud de experiencias muy ingeniosas. El azufre, que se funde y se solidifica á 111° permanece *sobrefundido* hasta la temperatura ordinaria cuando se enfría lentamente y en reposo.

Análogamente, el fósforo, que se solidifica á 44°, permanece líquido hasta 22° en el agua perfectamente tranquila. Si en este estado se toca el fósforo sobrefundido con un pedazo de la misma sustancia sólida, la solidificación empieza inmediatamente en el punto de contacto y se extiende con rapidez á toda la masa.

M. Gernez ha observado que también se provoca la solidificación de todas las sustancias que experimentan la sobrefusión, friccionando en la masa en fusión dos cuerpos sólidos entre sí, ó bien un cuerpo sólido contra las paredes de los tubos donde los cuerpos fundidos están.

3°. Finalmente, la influencia de viva agitación de las moléculas líquidas puede retrasar su congelación. Así es que el agua de los ríos no se congela sino una vez que la temperatura del aire exterior ha descendido mucho por bajo de cero.

595. **Aplicaciones de la fusión acuosa. — Mezclas frigoríficas.** — La desaparición de calor que acompaña la disolución, se ha utilizado para producir fríos artificiales más ó menos intensos. Este efecto se obtiene mezclando sustancias dotadas de afinidad recíproca, y una de las cuales por lo menos sea sólida, por ejemplo el agua y una sal, hielo y una sal, ácido y una sal : esto es lo que recibe el nombre de *mezcla frigorífica*. El descenso de temperatura es en ocasiones muy grande. Así, una mezcla de 4 partes en peso de cloruro de calcio en polvo con 3 de nieve ó de hielo machacado puede bajar desde + 10° hasta — 51°.

Fig. 585.

Nevera de las familias. — Neveras artificiales. — Con el nombre de *nevera de las familias* se fabrica un pequeño aparato que permite obtener hielo en todas las épocas del año. Consiste en una caja metálica de forma cilíndro-cónica (fig. 585), dividida en varios compartimientos concéntricos. En el centro A, así como en el compartimiento BB, se echa el agua que se trata de congelar; en los intermedios O y C se pone la mezcla frigorífica : por fin, el compartimiento exterior D se rellena de un cuerpo mal conductor, como el algodón, que intercepta el calor del exterior. La disolución de la mezcla y, por tanto, la rapidez del enfriamiento se activa imprimiendo un movimiento de rotación al líquido por medio de un manubrio.

Una vez congelada el agua, la fusión del hielo formado va saliendo poco á poco por la parte inferior, donde moja botellas de vino que de esta manera resultan *heladas*.

CAPÍTULO VII

VAPORIZACIÓN EN EL VACÍO.

—

TENSIÓN MÁXIMA DE LOS VAPORES.

596. **Definiciones.** — Hemos visto que el paso del estado líquido al gaseoso recibe el nombre de *vaporización.*

Evaporación y ebullición. — Los vapores se forman unas veces lentamente en la superficie de los líquidos, y entonces se dice que hay *evaporación;* ya en la masa misma del cuerpo, y entonces tenemos la *ebullición.*

Líquidos volátiles y líquidos fijos. — Llámase líquidos *volátiles* á los que pueden vaporizarse á todas las temperaturas, y *fijos* á los que no emiten vapores á ninguna temperatura, como los aceites grasos.

Sólidos volátiles. — Hay cuerpos sólidos, como el hielo, el arsénico, el alcanfor y las materias olorosas que emiten vapores inmediatamente sin pasar por el estado líquido. Si la temperatura es suficientemente elevada, todos los metales se vaporizan.

Coloración de los vapores. – Los vapores son transparentes, como los gases, y generalmente incoloros; sólo escaso número de líquidos dotados de color emiten vapores que también lo tienen.

Fuerza elástica ó tensión de los vapores. — Los vapores tienen como los gases fuerza elástica mediante la cual ejercen sobre las paredes de los vasos que los contienen presiones más ó menos considerables.

Fig. 586.

Si se hace pasar una gota de éter por la rama menor, que está cerrada, de un tubo de vidrio en forma de sifón (fig. 586), medio lleno de mercurio, y se introduce ese tubo en un baño de agua á 45° próximamente, se ve bajar al mercurio lentamente en la rama menor : el espacio *ab* se llena evidentemente de un gas cuya fuerza elástica equilibra la columna de mercurio *cd* y la presión atmosférica que se ejerce en *d.* Ahora bien, este gas no es sino vapor de éter. Si se enfría el agua del vaso, ó si se retira el tubo del baño, lo que produce el mismo efecto, el vapor que llenaba el espacio *ab* desaparece rápidamente, y la gota de éter se reforma.

597. **Formación de los vapores en el vacío.**— Cuando se introduce un líquido en el vacío, la formación de los vapores es *instantánea*.

En efecto, si se hacen penetrar algunas gotas de agua, de alcohol y de éter respectivamente en tubos barométricos B, C, D, que por su parte inferior se bañan en una misma cubeta de mercurio (fig. 587), obsérvase que instantáneamente bajan más ó menos en los diversos tubos los niveles del mercurio. Ahora bien, lo que deprime el mercurio no es el peso del líquido introducido, pues este peso es apenas una ligera fracción del que alcanza el mercurio desalojado. Ha habido, pues, para cada líquido *una producción instantánea de vapores* cuya fuerza elástica ha rechazado la columna mercurial.

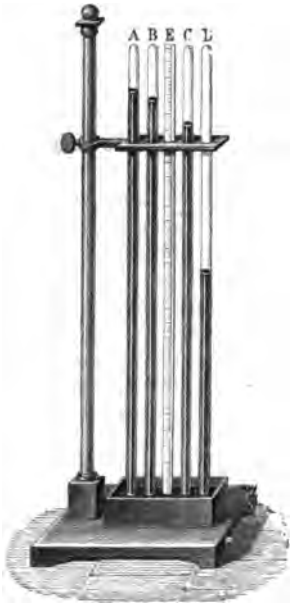


Fig. 587.

Si se compara cada uno de los tubos de vapor con otro A donde se ha conservado el vacío seco, se observa que la depresión es mayor en el tubo de alcohol que en el barómetro de agua, y mayor en el tubo de éter que en los otros dos. De manera que estos hechos pueden resumirse en los enunciados generales siguientes:

1°. *Los líquidos se vaporizan instantáneamente en el vacío.*

2°. *Dada igual temperatura, los vapores de líquidos diferentes no poseen la misma tensión.*

Por ejemplo, á 20° la tensión del vapor de éter es con corta diferencia 25 veces mayor que la del vapor de agua.

598. **Vapores saturantes ó saturados. — Tensión máximum.** — Si se introducen nuevas porciones de éter en el tubo D, se ve primero aumentar la depresión, permanecer luego constante y el éter introducido se conserva líquido, *si la temperatura no varía*. De modo que para una temperatura determinada hay un límite á la vaporización en un espacio cerrado. Esto es lo que se expresa diciendo que dicho espacio se encuentra entonces *saturado* y que el vapor que lo llena es *saturante* ó *saturado*. El carácter *exterior* de la saturación es la presencia de un *exceso líquido* en contacto de la atmósfera gaseosa. También se dice que el vapor ha alcanzado entonces la *tensión máxima*. Si se hace variar el volumen ocupado por el vapor, la tensión máxima sigue siendo la misma con tal que la temperatura sea constante y que siempre haya exceso líquido. La *tensión máxima* aumenta con la temperatura; pero dada una fija *es independiente de la presión*.

Demuéstrase fácilmente este hecho produciendo el vapor saturante — con *exceso líquido* — en un tubo barométrico graduado, que se puede introducir más ó menos en una cubeta profunda (fig. 588).

Por el contrario, los vapores no saturados (que no están en contacto con su líquido generador) son comparables á los gases y poseen todas sus propiedades.

En efecto, si en el tubo (fig. 588) no se introduce más que una pequeña cantidad de éter, á fin de que el vapor que se forme no alcance el estado de saturación, se puede demostrar que el vapor se conduce como un gas ordinario, y que su fuerza elástica varía con el volumen que se le hace ocupar, conforme á la ley de Mariotte.

599. Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua

Fig. 588.

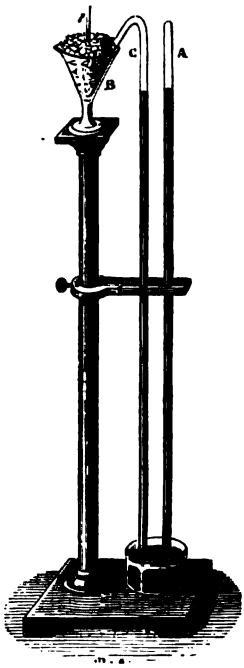


Fig. 589.

por bajo de cero. — Experiencias de Gay-Lussac. — El agua emite vapores aun cuando se encuentre reducida á hielo ó que esté á temperatura inferior á cero. Gay-Lussac fué quien primero determinó su tensión máxima. Al efecto se sirvió de dos tubos barométricos llenos de mercurio y que penetran en una misma cubeta (fig. 589). Uno

de ellos, A, que es recto, está libre de aire y de humedad : sirve de barómetro; el otro, CB, está encorvado de manera que parte de la cámara barométrica penetre en una mezcla frigorífica. Si se hace pasar un poco de agua á la pequeña rama B, obsérvase que el nivel del mercurio baja en C. La depresión disminuye cuando la temperatura de la mezcla baja, desde 4,60 mm á 0° hasta 0, 33 mm á — 30°.

Observación. — En esta experiencia, la parte B y la C del barómetro mojado no están ambas á la temperatura de la mezcla frigorífica; pero según el *principio de Watt ó principio de la pared fría*, la tensión máxima del vapor es *la misma en todas partes, y corresponde á la más baja de las dos temperaturas.*

600. **Principio de Watt ó de la pared fría.** — Cuando se ponen en comunicación dos vasos cerrados que contienen un mismo líquido á temperaturas desiguales, la tensión de vapor que se establece finalmente en estos dos vasos *no es*, como podría creerse, *la tensión media entre las que existían ya en cada uno de ellos.* Por ejemplo, sean dos matraces, uno A, que contenga agua á cero, y el otro, B (fig. 590), con agua mantenida á 100°. Mientras los matraces no comunican

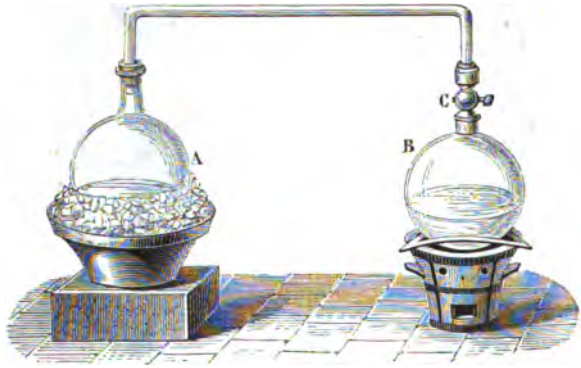


Fig. 590.

entre sí, la tensión es igual, á 4,6 mm en el primero y á 760 mm en el segundo. Pero así que la comunicación se establece por medio de la llave C, el vapor del matraz B se precipita al matraz A en virtud de su exceso de tensión, pero se condensa allí inmediatamente, puesto que el matraz es mantenido á cero. De ahí resulta que el vapor no puede adquirir en el matraz B tensión superior á la del matraz A ; hay pues simplemente destilación de B hacia A, sin aumento de tensión.

Así pues, cabe sentar este principio general, que Watt enunció por primera vez: *Cuando dos vasos que se encuentran á temperaturas desiguales y que contienen el mismo líquido en exceso, comunican entre sí, la tensión del vapor es la misma en ambos, é igual á la tensión máxima que corresponde á la más baja de las dos temperaturas.*

601. **Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua entre cero y 100 grados. — Experiencias de Dalton.** — Dalton ha medido las tensiones máximas del vapor entre cero y 100°. Servíase al efecto de dos barómetros A y B (fig. 591), que se introducían en una marmita de fundición llena de mercurio y colacada sobre un hornillo. Uno, B, está seco; el otro, A, contiene el vapor de agua. Ambos son mantenidos en un mango ó cilindro de vidrio lleno de agua, donde se introduce un termómetro T. Caliéntase gradualmente la marmita y por consiguiente el agua del mango, y entonces se va anotando de grado en grado sobre una escala E la depresión que se produce progresivamente en el tubo A. Las diferencias de nivel observadas (reducidas á 0°) dan á conocer las tensiones. Operando así fué como Dalton construyó antes que nadie una *Tabla de las tensiones máximas del vapor de agua* de 0° á 100°.

602. **Determinación de las**

Fig. 591.

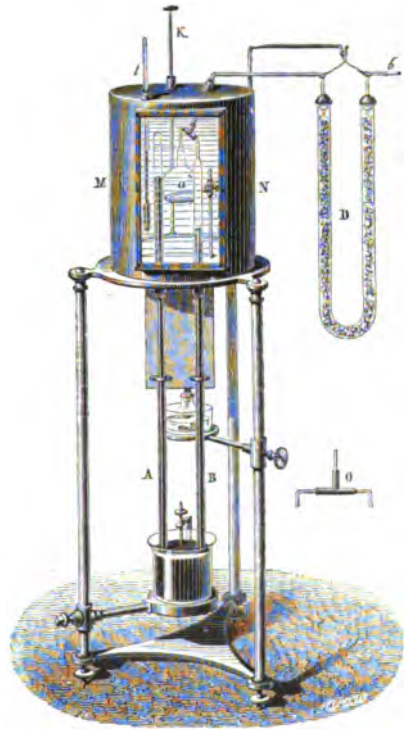


Fig. 592.

tensiones máximas del vapor de agua entre cero y 50°. — Experiencias de Regnault. — *Descripción del aparato.* — Regnault perfeccionó el aparato de Dalton, reemplazando el mango ó cilindro

por una caja de palastro MN (fig. 592) cuyo fondo sostiene dos conductos, en los cuales penetran las extremidades superiores de los dos tubos A y B, mantenidas por placas de goma elástica. El barómetro de vapor B comunica con un pequeño matraz *a*, por medio de un conducto de cobre de tres brazos (representado en O á la derecha del dibujo). La rama superior de este conducto establece la comunicación con una máquina neumática por medio de un tubo D de piedra pómez empapada en ácido sulfúrico.

Operación. — Antes de fijar los tubos en la caja se introduce en el matraz *a* una pequeña cantidad de agua, parte de la cual se hace destilar en el tubo B calentando ligeramente el matraz. Entonces se hace el vacío : el agua destila de manera continua del matraz y del tubo barométrico hacia el tubo D, que condensa los vapores. Cuando se han vaporizado varios gramos de agua, todo el aire contenido en el tubo y en el matraz ha salido y se cierra con la lámpara el tubo capilar que pone en comunicación el conducto de tres ramas con el tubo B. Llénase de agua la caja MN, caliéntase suavemente sea sobre un hornillo, sea con una lámpara de alcohol, mezclando constantemente, por medio de un agitador K, las diferentes capas del líquido. Un espejo de vidrio engarzado en la pared de la caja, permite medir con el catetómetro la altura del mercurio en los tubos ; las diferencias de nivel, reducidas á cero, dan á conocer las tensiones del vapor.

Así fué como Regnault construyó una *Tabla de las tensiones máximas del vapor de agua* entre cero y 50°.

603. **Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua por encima y por debajo de cero. — Experiencias de Regnault.** — Para medir la fuerza elástica del vapor de agua á temperaturas superiores á 100° se han puesto en práctica dos procedimientos, uno por Dulong y Arago en 1830 y el otro por Regnault en 1844. Nos contentaremos con describir este último.

Principio del método. — Consiste en hacer hervir agua en un vaso cerrado, bajo presión conocida de antemano, y en medir la temperatura de la ebullición. Se funda en el hecho experimental de que *cuando un líquido entra en ebullición, la fuerza elástica del vapor que se desprende es precisamente igual á la presión que soporta el líquido* (607).

Descripción del aparato. — El aparato se compone de un vaso de cobre C (fig. 593), herméticamente cerrado y lleno de agua hasta la tercera parte poco más ó menos. Cuatro termómetros atraviesan la tapadera : dos de ellos penetran en las primeras capas del líquido, y los otros dos en las inferiores. Del vaso C arranca un tubo AB que va á adaptarse en el gollete de un matraz de vidrio M, de 24 litros de capacidad, lleno de aire. El tubo AB está rodeado por un mango ó cilindro D, donde circula una corriente de agua fría que cae de un depósito E. De la parte superior del matraz M parten dos tubos : uno comunica con un manómetro de aire libre O ; el otro HH', que es de plomo, con una máquina neumática, ó con una bomba impelente, según que se desee enrarecer ó comprimir el aire del matraz. Por fin, el depósito K está lleno de agua á la temperatura ambiente.

Operación. — 1°. Supongamos primeramente que se trata de medir la tensión por bajo de 100°. Pónese la extremidad H' del tubo de plomo en comunicación con la máquina neumática y se enrarece el aire en el matraz M, y por tanto en el vaso C. Si entonces se calienta suavemente este vaso, el agua que contiene entra en ebullición, á una temperatura tanto menos elevada cuanto más enrarecido está el aire, es decir, cuanto más débil es la presión. Por lo demás, los va-

pores se condensan en el tubo AB, donde sufren enfriamiento permanente, y la presión indicada al principio por el manómetro no aumenta : en consecuencia la tensión del vapor mientras dura la experiencia permanece siendo igual á la presión que ejerce sobre el líquido el aire del gasómetro. Sólo falta ahora leer

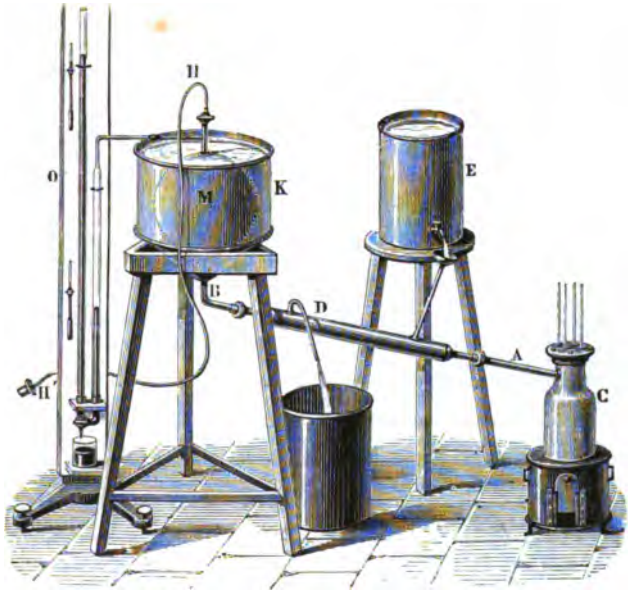


Fig. 593.

simultáneamente el manómetro y los termómetros para determinar la tensión de vapor á temperatura conocida. Dejando entrar después un poco de aire en los tubos y en el vaso C, á fin de aumentar la presión, se efectúa una nueva observación, y así se continúa hasta 100°.

2°. Para medir la tensión del vapor por encima de 100°, se pone en comunicación el tubo H' con una bomba impelente, por medio de la cual se somete el aire del matraz y del vaso C á presiones crecientes, superiores á la de la atmósfera. La ebullición es entonces retardada (612), y basta observar simultáneamente el manómetro y los termómetros para obtener las tensiones del vapor por encima de 100°.

Resultados. — Regnault construyó dos tablas que expresan las tensiones máximas del vapor de agua, una desde — 10° hasta 100°, y la otra de 100° á 230°. Los números de la primera fueron determinados directamente por la experiencia; los de la segunda se calcularon con ayuda de una *fórmula de interpolación*

$$\log F = a + b\alpha^t + c\delta^t.$$

F es la tensión máxima en milímetros de mercurio, t la temperatura (valorada con el termómetro de aire) y a, b, c, α δ, cinco cons-

tantes calculadas por medio de cinco valores de F medidos directamente á temperaturas conocidas, regularmente espaciadas entre las temperaturas extremas. Los resultados que suministra esta fórmula empírica se encuentran sensiblemente acordes (con aproximación de 1/400) con los de la experiencia.

Estas tablas prueban que la tensión del vapor de agua crece según una ley mucho más rápida que *la proporcionalidad á la temperatura.* Así las tensiones son :

4,6	mm	á	0°	2	atm	á	120°,6
91,98	—	á	50°	10	—	á	180°,3
760,0	—	á	100°	28	—	á	230°,9

Observaciones. — 1°. *Fórmula de Duperray.* — Se han propuesto varias otras formas de la fórmula de interpolación (Roche, Bertrand, etc.). La de Duperray, $F = \theta^4$, en que F representa la presión (en Kg por cm²) y θ la temperatura (en *centenas* de grados), conviene para las aplicaciones industriales.

2°. *Experiencias de Cailletet y de Colardeau.* — Estos físicos han medido por un método especial las tensiones máximas del vapor de agua hasta 365°, temperatura en que fijaron el punto crítico del vapor de agua : la tensión correspondiente es de 200, 5 atm.

604. **Tensiones máximas de los vapores de diversos líquidos.** — El vapor de agua fué por de pronto el único objeto de los trabajos de los físicos y esto á causa de sus numerosas aplicaciones. Dalton había admitido para los demás líquidos que sus *tensiones máximas son* iguales *para temperaturas* igualmente alejadas *de sus puntos respectivos de ebullición.* Regnault se valió de los mismos procedimientos que le sirvieron en la medida de las fuerzas elásticas del vapor de agua para determinar la de los vapores de cierto número de líquidos. Así observó que esta ley de Dalton *es completamente inexacta.*

605. **Tensiones máximas de las disoluciones salinas ó ácidas.** — Cuando el agua, ó cualquier otro líquido, mantiene en disolución una sal, un ácido, una sustancia cualquiera, la experiencia prueba, que, dada igual temperatura, la tensión del vapor es *más pequeña que cuando el líquido se encuentra en estado de pureza*, y *tanto menor* cuanto *más concentrada* está la disolución.

CAPITULO VIII

CAMBIO DE ESTADO DE LOS CUERPOS.

EBULLICIÓN Y EVAPORACIÓN.

EBULLICIÓN.

606. **Ebullición : Definición y descripción del fenómeno.** — La *ebullición* es una producción rápida de vapor, formando burbujas más ó menos gruesas, en la masa misma de un líquido.

Cuando se calienta un líquido, por ejemplo el agua, por su parte

OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

inferior, las primeras burbujas que aparecen no son sino aire disuelto en el agua, que se desprende. Después se elevan desde todos los puntos calentados de las paredes pequeños globulitos de vapor; pero al atravesar las capas superiores cuya temperatura es más baja, se condensan antes de alcanzar la superficie (fig. 594). De la formación y condensación sucesivas de estas primeras burbujas de vapor depende el ruido que precede á la ebullición. De ordinario se expresa este fenómeno característico de la primera fase de la ebullición diciendo que *el agua canta.*

Fig. 594.

Todavía no hierve el líquido; su superficie libre permanece horizontal, tranquila y unida. Pero pronto ocurre, por causa de la elevación creciente de la temperatura, que suben gruesas burbujas, para ir á reventar en la superficie : entonces empieza la *ebullición* propiamente dicha. Está caracterizada por la agitación de la masa entera.

607. **Leyes de la ebullición.** — I. *Enunciado.* — Este fenómeno se encuentra sometido á las tres leyes siguientes :

1°. *La ebullición empieza á una temperatura determinada, que varía de un líquido á otro, pero que es siempre idéntica para una misma sustancia, que esté en las mismas condiciones de presión.*

Fig. 595.

La temperatura que corresponde á la ebullición, bajo la presión atmosférica normal, es su *punto de ebullición.*

2°. *Desde que empieza la ebullición se mantiene estacionaria la temperatura del líquido.*

3°. *Mientras un líquido hierve, la fuerza elástica de su vapor es igual á la presión exterior que se ejerce en su superficie.*

II. *Demostración experimental.* — 1ª y 2ª LEY. — Se pueden demostrar las dos primeras leyes por un procedimiento muy sencillo, que se debe á Dulong. El vapor se produce en una retorta de vidrio (fig. 595) y va á condensarse, á medida de su producción, en un tubo frigorífico adaptado al abductor de la retorta. Por lo demás, este tubo comunica de manera permanente con un matraz lleno de aire, cuya fuerza elástica es indicada por un manómetro. Un termómetro cuyo depósito se coloca algo por encima de la superficie libre del líquido, marca á cada momento la temperatura de la ebullición. Pues bien, se observa que, sea cual fuere la presión indicada por el manómetro, con tal que permanezca *constante*, la ebullición del líquido empieza á temperatura que es siempre la misma (para una presión exterior idéntica), y que se conserva invariable mientras la ebullición dura.

OBSERVACIÓN. — Este experimento de demostración sirve al mismo tiempo para determinar puntos de ebullición de los diversos líquidos.

Fig. 596.

3ª LEY. — Es posible demostrar sencillamente la tercera ley por medio de un tubo encorvado A, de forma de barómetro de sifón, cuya rama menor estuviera cerrada (fig. 596). Una vez llena de mercurio esta rama menor, se hace penetrar en ella cierta cantidad de agua y después se introduce todo el aparato entero en un matraz medio lleno de agua. Cuando se eleva el agua del matraz á la ebullición, la de la rama menor del sifón acaba por hervir á su vez y entonces se observa que los niveles del mercurio se ponen en el mismo plano horizontal en ambas ramas. Esto prueba que ambos soportan la misma presión; ahora bien la que se ejerce en la rama mayor es la presión atmosférica: luego *la fuerza elástica del vapor de agua hirviendo es igual á la presión atmosférica.*

608. **Determinación de los puntos de ebullición.** — Los puntos de ebullición de todas las sustancias químicamente definidas han sido determinados por métodos análogos al que acabamos de indicar. Este coeficiente es uno de los caracteres físicos más importantes de la pureza de los cuerpos.

La experiencia prueba que hay varias circunstancias capaces de hacer variar la temperatura de ebullición de un líquido, á saber: la existencia de ciertas sustancias en disolución, la naturaleza de las paredes de los recipientes, la ausencia de aire ó de otro gas en disolución en el líquido y principalmente la presión exterior.

609. **Influencia de las sustancias en disolución.** — Toda sustancia disuelta en un líquido, cuando no es volátil ó si lo es menos que el líquido, retarda la ebullición, tanto más cuanto más concentrada es la disolución.

Así el agua, que hierve á 100° cuando está pura, no lo hace sino á temperaturas más elevadas cuando está saturada de diferentes sales. El agua saturada de sal marina hierve á 109°; si lo está de cloruro de calcio sólo puede hacerlo á 179° C.

Las disoluciones ácidas presentan la misma anomalía.

Conviene recordar aquí las experiencias de Rudberg ya citadas. Éstas demostraron que si bien la temperatura de ebullición *del agua* es superior á 100° por efecto de las sustancias que mantiene en disolución, la temperatura *del vapor* que se desprende es no obstante igual siempre á 100°, como si el agua estuviera pura, *con tal que la presión permanezca igual á 760 mm.*

610. **Influencia de la naturaleza de las paredes de los recipientes.** — Gay-Lussac observó que tomando como punto 100° la temperatura de ebullición del agua destilada, en un vaso de cobre (bajo la presión 760 mm), este mismo líquido no entra en ebullición en un matraz de vidrio sino á 101°; dada igual presión y cuando se ha limpiado bien el vaso de vidrio, el punto de ebullición puede elevarse hasta 105° y aun 106°.

Sin embargo, un sencillo fragmento de metal, colocado en el fondo del matraz, basta entonces para volver á 100° la temperatura de la ebullición. Por el mismo método se pueden hacer desaparecer las violentas sacudidas que acompañan la ebullición de las disoluciones salinas ó ácidas en los vasos de vidrio.

Lo mismo que en el caso de las sustancias en disolución, la temperatura del vapor no depende de la que toma el agua en los vasos de vidrio.

611. **Influencia de la ausencia de aire ó de gas disuelto.** — La ausencia de aire en el agua retarda también su temperatura de ebullición.

Deluc fué el primero en observar que el agua privada de aire por una ebullición previa puede ser calentada sin hervir hasta 112° en un matraz de largo cuello.

Experiencias de Donny. — Donny (de Gante) ha estudiado este fenómeno valiéndose de un tubo de vidrio AB (fig. 597) encorvado por una punta y terminado por la otra en una gruesa bola de la misma materia, seguida de otra más pequeña

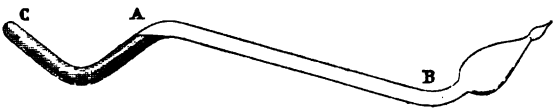


Fig. 597.

que termina en punta afilada. Antes de cerrar ésta se introduce agua en el tubo, por el mismo procedimiento que el alcohol en un termómetro, y después se la hace hervir cierto tiempo para expulsar todo el aire. Soldando entonces con la lámpara la punta afilada, se tiene agua en la rama encorvada y vapor á tensión muy escasa en el tubo AB y en las bolas. Ahora bien, si se introduce ahora la parte AC, llena de agua, en una solución concentrada de cloruro de calcio, y si

se calienta gradualmente, la temperatura puede subir á 130° sin que se manifieste ninguna ebullición en el tubo. Esta no ocurre hasta los 138°; pero entonces ocurre de golpe y el agua es lanzada á las bolas, que en ocasiones se rompen.

Experiencias de Dufour. — Dufour (de Lausana) preservaba los líquidos en experiencia del contacto del aire suspendiéndolos dentro de líquidos de la misma densidad, pero menos volátiles.

De esta manera averiguó que el agua suspendida en una mezcla apropiada de esencia de clavo y de aceite de linaza calentada en el baño de maría, no se transforma bruscamente en vapor sino á una temperatura próxima á 120°. El ácido sulfuroso líquido, que hierve normalmente á — 10°, permanece líquido hasta + 18° cuando se le suspende en una mezcla de agua y de ácido sulfúrico.

612. Influencia de la presión sobre la temperatura de ebullición. — 1°. *Influencia de la disminución de presión. — Ebullición del agua á baja temperatura.* — Para demostrar que la temperatura de ebullición disminuye con la presión, se coloca bajo el recipiente de la máquina neumática una cápsula que contenga agua á 30° próximamente, y después se hace el vacío. Entonces se ve que el líquido entra en ebullición con gran rapidez: el fenómeno persiste, aun cuando se produce en vaso cerrado, porque el vapor es aspirado por la máquina á medida de su producción.

Fig. 598.

Experiencia de Franklin. — Se puede efectuar la misma experiencia sin recurrir á la máquina neumática. Para ello se toma un matraz de vidrio donde se hace hervir agua por espacio de algunos instantes. Cuando los vapores que se desprenden han arrastrado consigo todo el aire del matraz, se tapa éste herméticamente y se le vuelca (fig. 598). Si entonces se enfría la parte superior con una esponja empapada de agua fría, los vapores se condensan, hácese el vacío y se produce viva ebullición. Esto es lo que se llama la *experiencia de Franklin.*

Ebullición en el vacío. — En el vacío absoluto, el agua entraría en ebullición á 0°, puesto que la tensión de su vapor es ya de 4, 6 mm.

Ebullición al aire libre en las montañas. — El agua hierve por debajo de 100° en las altas montañas por efecto de la disminución de presión. En el Monte Blanco se produce el fenómeno á 84°.

2°. *Influencia del aumento de presión.*— Cuando la presión aumenta

se produce el efecto contrario. Así, el agua no hierve sino á 120°,6 cuando se ejerce en su superficie libre una presión de dos atmósferas.

Producción del vapor en vaso cerrado. — Esta influencia se deja sentir principalmente cuando se trata de hacer hervir los líquidos, no ya al aire libre sino en vasos cerrados. Entonces se modifica profundamente el fenómeno de la ebullición. Como los vapores que se producen no encuentran ninguna salida, su tensión y su densidad aumentan cada vez más con la temperatura; pero el desprendimiento continuo que constituye la ebullición es imposible. De consiguiente, mientras que en un vaso abierto la temperatura de un líquido no puede traspasar su punto de ebullición, en un vaso cerrado puede elevarse por el contrario mucho más.

Experiencias de Cagniard de Latour. — Sin embargo, el estado líquido tiene entonces un límite. Si se introduce agua, alcohol ó éter en gruesos tubos de vidrio que se cierran con la lámpara después de haber expulsado el aire de ellos por ebullición, se observa que sometiendo estos tubos á un foco de calor suficiente, llega un instante en que el líquido desaparece de repente, transformándose en un vapor cuyo volumen se diferencia poco del volumen del líquido. De esta manera descubrió Cagniard de Latour que el éter sulfúrico se reduce totalmente á vapor á 200°, en un espacio menor que el doble de su volumen en estado líquido, y que entonces su tensión es de 38 atmósferas.

Fig. 599.

613. **Aplicación : nivelación hipsométrica ó medida de las alturas con el hipsómetro** [1]. — *Método.* — Si se observa, por ejemplo, que el agua hierve á 95° en la cima de una montaña mientras que en su base lo efectúa á 98°, y si se buscan en las tablas de las fuerzas elásticas las tensiones correspondientes, se hallan números que representan, en milímetros de mercurio, las fuerzas elásticas que tenía el vapor en el momento que se producía en lo alto y en lo bajo de la montaña, y por consiguiente las presiones atmosféricas soportadas por el agua que hierve en las dos estaciones. Conociendo así la altura barométrica en ambos puntos, sólo falta aplicar las fórmulas ya dadas para medir la altura de las montañas por medio del barómetro.

Instrumentos. — Para aplicar este método no se usan sino termómetros muy sensibles, graduados únicamente de 80° á 100° poco más ó menos, de modo que, ocupando cada grado larga extensión de la escala, se puedan apreciar los décimos y aun los vigésimos de grado. En este principio se funda el *termómetro hipsométrico* ó *hipsómetro* de Regnault, que consiste en un termómetro de esa clase, susceptible de adaptarse á una estufa de vapor (fig. 599). Para este fin construyó Regnault tablas que indican la tensión del vapor de agua, de 85 á 101°, por décimos de grado.

1. Del griego ὕψος, altura, y μέτρον, medida.

614. **Aplicación : Marmita de Papin** ó **digestor.** — Dionisio Papin fué el primero que estudió la producción del vapor de agua en un vaso herméticamente cerrado.

Descripción del aparato. — El aparato que utilizó fué una especie de marmita ó de vaso cilíndrico de bronce M (fig. 600). Ciérrasela por medio de una tapadera del mismo metal, que un tornillo de presión mantiene sólidamente aplicada contra los bordes. La cerradura se hace más hermética por la interposición de láminas de plomo entre estos bordes y los de la marmita. En la tapadera se adapta un conducto de bronce donde penetra libremente un perno de acero *u*. Debajo de este hay en la tapa un agujero cerrado por medio de una válvula cónica sobre la cual descansa el perno. Este último es mantenido contra la válvula por una palanca *ab*, móvil en su extremidad *a*. Finalmente, un peso *p*, que se cuelga á lo largo de la palanca, permite ejercer sobre el perno *u* presión variable. La carga de la válvula se arregla de modo que ésta se levante y deje salir el vapor cuando ha alcanzado en la marmita cierta tensión, por ejemplo 6 atmósferas [1].

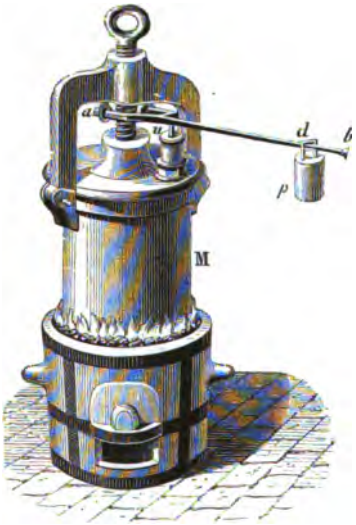


Fig. 600.

Experiencia. — Una vez llena de agua en sus dos terceras partes la marmita de Papin, se la cierra y se la calienta en un hornillo. De esta manera puede elevarse el líquido á temperatura muy superior á 100° sin hervir, y la tensión del vapor puede alcanzar 5 á 6 atmósferas, según la carga de la válvula de seguridad. Si entonces se abre ésta, sale silbando un chorro de vapor, y el agua entra inmediatamente en ebullición mientras su temperatura baja hasta 100°.

Usos. — La marmita de Papin puede utilizarse para aumentar la acción disolvente de los líquidos, gracias á la surelevación de temperatura; por esto se le da también el nombre de *digestor*.

615. **Calor de vaporización.** — La cantidad de calor absorbida por la *unidad de peso* de un líquido para pasar al estado de vapor, se llama *calor de vaporización*.

1. Así se puede evitar la ruptura del aparato; de ahí el nombre de *válvula de seguridad* que se da á ese órgano.

Este calor se transforma al desaparecer, por una parte en *trabajo interno*, gastado en vencer la cohesión de las moléculas de agua, y por otra en *trabajo externo*, gastado por el vapor para vencer la presión exterior.

Por lo demás, sea cual fuere la temperatura á que se produce un vapor, siempre hay desaparición de calor. Si se vierte en la mano un líquido volátil, por ejemplo éter, siéntese frío muy vivo, que procede del calor absorbido por la vaporización. Esta absorción puede convertirse de tal manera en causa de frío muy intenso.

616. **Liquefacción ó condensación de los vapores. — Restitución del calor de vaporización.** — La *liquefacción ó condensación de los vapores* es el paso inverso del estado gaseoso al líquido. Tres causas pueden operar la condensación : el enfriamiento, la compresión y la afinidad química. Las dos primeras no actúan más que sobre los vapores en estado de saturación; pero la última produce la liquefacción de los vapores, aun de los más enrarecidos. Así es como gran número de sales absorben, condensándolo, el vapor de agua de la atmósfera, por escasa que sea la proporción en que allí existe.

Cuando los vapores se condensan, la fuerza viva que había sido comunicada á las moléculas durante la vaporización se transforma inversamente en una cantidad equivalente de calor sensible. En

Fig. 601.

efecto, pruébase por la experiencia que un peso dado de vapor emite al convertirse en líquido cantidad de calor rigurosamente igual á la que el mismo peso de agua había absorbido al vaporizarse. Para ésto se hace llegar una corriente de vapor á 100° hasta cierto peso de agua fría que se eleva rápidamente hasta 100°, y se observa que

el calor cedido al agua es exactamente igual al consumido durante la vaporización.

617. **Aplicación de la ebullición. — Ensayo de los vinos por destilación : Alambique de Salleron.** — Salleron construyó para determinar la riqueza alcohólica de los vinos y otros espirituosos, un *aparato de destilación* que es una aplicación de la ebullición.

Compónese de una especie de pequeño *alambique*, reducido á un matraz colocado sobre un trípode, y que se puede calentar por medio de una lámpara de alcohol (fig. 601), y de un pequeño serpentín de cobre, colocado en un vaso de cobre lleno de agua fría : debajo está una probeta que recibe el producto de la destilación. En la probeta se marcan tres divisiones : una, *a*, está destinada á marcar el volumen de vino que se debe destilar ; las otras dos, marcadas $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{3}$, sirven para valorar el volumen del líquido que resulta de la destilación.

Operación. — Se empieza por llenar la probeta hasta *a* del vino que se trata de ensayar ; después se vierte su contenido en el matraz y se opera la destilación. Con los vinos ordinarios se la prolonga hasta que el líquido destilado se eleve en la probeta á la división $\frac{1}{3}$, y á la $\frac{1}{2}$ para los muy alcohólicos : entonces se puede admitir que todo el alcohol del vino ha pasado á la probeta. Por fin, se acaba de llenar la probeta con agua destilada hasta *a*, lo que proporciona un *líquido del mismo volumen que el del vino con que se ha experimentado é igualmente rico en alcohol, pero libre de toda sustancia extraña.* Sólo falta calcular el grado de este líquido con el alcoholímetro de Gay-Lussac. El aparato de Salleron va acompañado de un alcoholímetro centesimal, de un termómetro y de una tabla de correcciones.

EVAPORACIÓN.

618. **Definición del fenómeno.** — Ya se ha visto que se entiende por *evaporación* una producción lenta de vapor en la superficie de un líquido. Gracias á él secan en el aire las telas mojadas ó desaparece completamente al cabo de cierto tiempo el agua contenida en un vaso abierto. La evaporación producida en la superficie de los mares, de los lagos, de los ríos y del suelo es la causa de los vapores que ascienden en la atmósfera para condensarse en forma de nubes y resolverse al fin en lluvia.

Todo líquido se evapora apenas deja de ser nula su tensión de vapor ; pero su evaporación cesa desde que el aire ambiente está saturado, sea cual fuere la temperatura.

610. **Casos particulares de evaporación.** — 1°. *Evaporación del ácido sulfúrico.* — Este líquido deja de emitir vapores por debajo de 30°, aun en el vacío. En efecto, si se colocan bajo el recipiente de la máquina neumática dos cápsulas que contengan, una ácido sulfúrico y la otra agua de barita, y se hace el vacío, no se forma precipitado blanco de sulfato de barita mientras la temperatura es inferior á 30°.

2°. *Evaporación del mercurio.* — Faraday la estudió en una experiencia concluyente. Aplicando una hoja de oro sobre la extremidad inferior de un tapón, y cerrando con éste un frasco lleno de mercurio, vió al cabo de algunos días que el oro blanqueaba amalgamándose ; además, observó que el fenómeno no se producía sino en tanto cuanto la temperatura era superior á — 6°. De esto dedujo que la temperatura límite de evaporación del mercurio era — 6°. Pero ya en 1838 había observado Regnault que el mercurio se vaporiza á — 15° ; y después de él, Merget (de Lyón) notó que este líquido sigue emitiendo vapores todavía á — 44°. Además, reconoció que los vapores mercuriales poseen un poder tal de difusión que en los locales grandes y elevados existen desde el suelo hasta el techo, á la temperatura ordinaria, aun cuando los emitan superficies de evaporación poco extensas.

620. **Circunstancias que aceleran la evaporación.** — Cuatro circunstancias especiales influyen en la evaporación, á saber: 1°. la *elevación* de la temperatura; 2°. la *disminución* de la cantidad de vapor del mismo líquido difundido por la atmósfera ambiente; 3°. la renovación de esta atmósfera; 4°. la extensión de la superficie de evaporación.

La elevación de temperatura acelera la evaporación por el aumento de tensión que comunica á los vapores.

Para comprender la influencia de la segunda causa, observemos que la evaporación de un líquido sería nula en un espacio saturado del vapor del mismo líquido, y que alcanzaría su máximum en un aire completamente purgado de este vapor. De ahí resulta que la evaporación varía entre estos dos casos extremos, según que la atmósfera ambiente está ya más ó menos cargada de los mismos vapores.

Cuanto á la renovación de la atmósfera, su influencia se explica de la misma manera; pues si no se renueva el aire ó el gas ambiente, queda pronto saturado y cesa toda evaporación. La influencia de la cuarta causa es evidente.

621. **Frío debido á la evaporación.** — Cuando un líquido que se evapora no recibe cantidad de calor equivalente á la que se vuelve *latente*, su temperatura baja por necesidad, y su enfriamiento es tanto mayor cuanto más rápida es la evaporación.

Experiencia de Leslie. — Así fué que Leslie logró congelar agua por el simple efecto de una evaporación rápida. Colócase debajo del recipiente de la máquina neumática un vaso de vidrio que contenga ácido sulfúrico concentrado, y encima una pequeña cápsula A de corcho ó de gutapercha (fig. 602), con algunos gramos de agua. Si se hace el vacío, el agua entra en ebullición y, como los vapores son absorbidos por el ácido sulfúrico á medida que se desprenden, prodúcese rápida evaporación que pronto origina la congelación del agua en la cápsula.

Fig. 602.

Crioforo de Wollaston. — Obtiénese el mismo resultado con el crioforo de Wollaston, que consiste en un tubo de vidrio encorvado, con dos bolas en sus extremos (fig. 603). Después de haber introducido en él un poco de agua y de expulsar el aire por el mismo procedimiento que para el tubo de Donny, se hace penetrar el agua en la bola A y se introduce la otra en una mezcla frigorífica. Como los vapores se condensan por el frío en la bola inferior y en el tubo, el agua de A entra en ebullición y suministra otros nuevos. Esta evaporación rá-

pida es causa de que el agua de la burbuja A se enfríe, acabando por convertirse en una masa de hielo.

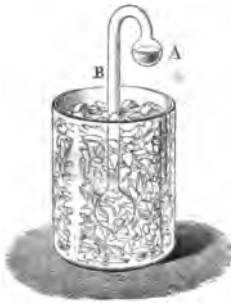


Fig. 603.

Congelación del mercurio. — Si se opera con líquidos más volátiles que el agua, particularmente con el ácido sulfúrico, que hierve á — 10°, obtiénese un frío bastante intenso para congelar el mercurio. Efectúase esta experiencia envolviendo de algodón una bola de vidrio llena de mercurio; luego, después de rociarla con ácido sulfúrico, se la coloca debajo de la campana de la máquina neumática y se hace el vacío; el mercurio no tarda en solidificarse.

Congelación del alcohol. — Se han obtenido progresiva y regularmente descensos de temperatura cada vez más considerables haciendo evaporar en el aire ó en el vacío líquidos procedentes de gases liquidados, por medio de fríos sucesivamente obtenidos. Así es como Pictet y Cailletet lograron hacer hervir ácido carbónico y el protóxido de ácido líquido en el vacío y Wroblewski el *etileno*. El frío originado por la evaporación de este último líquido ha hecho bajar la temperatura hasta — 136°. El sulfuro de carbono se congeló á eso de — 116° y el alcohol (que sólo pudieron poner espeso Thilorier y Despretz) se solidificó á — 130°, tomando el aspecto de un *cuerpo blanco*.

622. Aplicación del frío producido por la evaporación. — 1°. *Liquefacción de los gases permanentes.* — La más importante de las aplicaciones realizadas con estos descensos considerables de temperatura es sin disputa el nuevo método de liquefacción de los gases, aplicado sucesivamente por Cailletet y Pictet primero y después por Olszewski y Wroblewsky á los gases que en otra época se llamaban *permanentes*.

2°. *Alcarrazas.* — El frío producido por la evaporación se utiliza en los países cálidos para refrescar el agua por medio de *alcarrazas*. Dase este nombre á vasos de tierra bastante porosos para que el agua, filtrándose lentamente á través de sus paredes, vaya á evaporarse en su superficie, sobre todo si se les pone en una corriente de aire.

Congelador de E. Carré. — La congelación del agua por la evaporación en el vacío seco (con ácido sulfúrico) ha recibido una aplicación industrial en el congelador de Carré, que describimos al hablar de las máquinas neumáticas.

ESTADO ESFEROIDAL Ó CALEFACCIÓN.

623. **Definición é historia.** — Los líquidos que se vierten en superficies metálicas incandescentes presentan fenómenos notables, que parecen hallarse en contradicción con las leyes de la ebullición antes expuestas, porque una evaporación superficial en torno de la masa líquida reemplaza é impide la evaporación interior. El hecho fué observado hace más de un siglo por Leidenfrost y estudiado posteriormente por varios físicos, primero por Boutigny, y más tarde por Emilio Gossart.

Si se calienta hasta el rojo una cápsula de plata ó de platino de paredes gruesas, y se vierten en ella algunos gramos de agua con una pipeta, se observa que el líquido no se extiende en la cápsula y no la moja, según haría á la temperatura

ordinaria, sino que toma la forma de un globo aplanado. Esto es lo que Boutigny expresa al decir que pasa al *estado esferoidal*. En ese estado el agua se halla en apariencia muy tranquila ó animada de un movimiento giratorio muy rápido en el fondo de la cápsula, según su temperatura; y no sólo no entra en ebullición, sino que se vaporiza *cincuenta veces más lentamente* que si hubiera ebullición.

Por fin, si la cápsula se enfría, llega un momento en que ya no está bastante caliente para mantener el estado esferoidal. Entonces son mojadas por el líquido sus paredes y, según su temperatura, así hay ebullición violenta ó tranquila extensión de la gota.

Todos los líquidos pueden tomar esta apariencia, que alcanzan y conservan con tanta mayor facilidad cuanto más volátiles son y cuanto mejor pulimentado está el recipiente.

624. **Ausencia de contacto.** — Una particularidad que tiene como consecuencia todas las demás es la falta de contacto entre el líquido y la cápsula.

Boutigny se convenció de ello haciendo enrojecer una placa de plata dispuesta

Fig. 604.

con perfecta horizontalidad y vertiendo encima un gramo de agua teñida de negro; este líquido pasa al estado esferoidal. Pues bien, si se coloca la llama de una bujía á cierta distancia sobre la prolongación de la placa (fig. 604) se distingue claramente y de manera continua esta llama entre el esferoide y la placa. De ahí se deduce que el líquido se mantiene á escasa distancia de ésta, ó que efectúa vibraciones tan rápidas que la vista no puede distinguirlas.

Por lo demás, Gossart pudo sacar la fotografía instantánea de esta gota y del intervalo en cuestión, manteniéndola tranquila por medio de un pequeño trípode de alambre de platino en un haz de luz solar perfectamente horizontal.

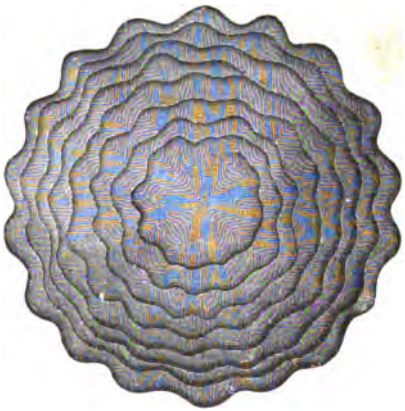


Fig. 605.

Un experimento clásico de Poggendorff pone en evidencia este mismo intervalo lleno de vapor mal conductor de la electricidad. Consiste en reunir la gota acidulada y la placa por medio de un alambre metálico en que se intercala igualmente una pila y un galvanómetro: la desviación del galvanó-

metro, indicadora del cierre del circuito conductor, no se produce sino en el momento de cesar la calefacción.

Gossart reemplaza la pila y el galvanómetro por un carrete de Ruhmkorff cuyas chispas son reforzadas por una botella de Leyden; la placa y la gota se colocan en el circuito principal (fig. 1030), y la botella de Leyden en derivación. La capa de vapor mala conductora se manifiesta entonces á distancia, vivamente iluminada, y con distintos colores según sean las sales disueltas en la gota. Es posible observar su imagen prolongada en un espejo giratorio, y reconocer en algunos puntos negros de la banda luminosa que sin embargo hay contactos parciales muy rápidos del líquido y de la cápsula. — Se puede atribuirlos á movimientos vibratorios muy rápidos y de amplitud demasiado escasa para modificar el contorno aparente de la gota, excepto cuando la temperatura elevada de la placa produce la forma estrellada tan conocida (fig 605).

625. **Forma de las gotas.** — El esferoide presenta necesariamente *en su parte superior* la forma general de toda gota líquida sobre un soporte, por ejemplo, de una gota de mercurio en un plano de vidrio; esta forma general resulta en efecto de que en cada plano horizontal trazado á través de la gota, á distancia vertical z del vértice, hay equilibrio entre la presión hidrostática zD y la capilar

$$S\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right).$$

Pero mientras que las gotas de mercurio (ó de cualquier otro líquido) sobre una placa tienen gruesos y ángulos de enlace que no son en manera alguna constantes, por efecto de la variabilidad de su adhesión al sólido, ó lo que equivale á lo mismo, por efecto de la tensión superficial S_3, muy variable igualmente en la base de la gota, aquí no ocurre lo mismo.

Como el esferoide está libre de toda acción molecular del soporte, queda envuelto completamente por una atmósfera gaseosa no homogénea, pero que sin embargo le deja tensión superficial constante y en consecuencia presión capilar y curvatura continuamente variables. De ahí resulta para todas las gotas calentadas un ángulo de empalme de 180° exactamente, una forma general constante, independiente, tanto en la parte baja del esferoide como en la alta, de la naturaleza del soporte y del líquido, y por fin para cada líquido mayor grueso que en cualquier otro soporte adherente. Este ángulo de empalme nulo y esta forma general (fig. 606) son una característica del estado esferoidal, que no es sino una forma capilar especial, y por otra parte el espesor de las gotas es una constante característica del líquido calentado, que depende sólo de su densidad y de su tensión superficial á la temperatura de calefacción[1].

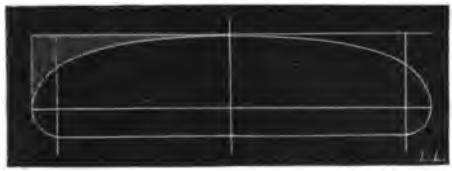


Fig. 606.

626. **Temperatura del líquido.** — Boutigny ha observado que la temperatura de los líquidos en estado esferoidal es *constantemente inferior* á su punto de ebullición. Por ejemplo, el agua se queda en 97°, el alcohol en 75°,5, el éter en 34°, el ácido sulfúrico en — 10°; pero la temperatura del vapor que no se produce en la masa del líquido puede ser más elevada.

Esta propiedad de los líquidos en estado esferoidal ha conducido á Boutigny á un experimento notable, el de la congelación del agua en una cápsula incandescente. Caliéntase al rojo una cápsula de platino y se vierte en ella algunos gramos de ácido sulfúrico anhidro. Este líquido, que no hierve sino á — 10°, se conduce en la cápsula según se ha visto anteriormente, quiere decir que su temperatura desciende por bajo de — 10°. Si entonces se agrega al ácido sulfuroso equeña cantidad de agua, ésta, enfriada por el ácido, se congela instantánea-

1. Véase *Comptes rendus*, 26 sept. 1887, nota de M. E. Gossart.

mente y, hallándose la cápsula *hecha todavía ascua*, se retira de ella un pedazo de hielo.

Gossart ha puesto en evidencia que esta misma propiedad subsiste sea cual fuere la presión, por ejemplo en el vacío, quiere decir que la temperatura de calefacción es, con toda presión, apenas inferior á la temperatura de ebullición regular bajo la misma presión, aumentando continuamente con ésta la diferencia entre dichas dos temperaturas.

Para ello utiliza una platina de cobre rojo de forma de tronco de cono P (fig. 607), cuya base superior es una cápsula ligeramente cóncava; la cara lateral se encorva en un conducto circular horizontal, RR, atravesado por una corriente de agua fría, sobre el cual se mastica una campana de vidrio en una ranura; tres tubos *t*, *t'*, *t''*, atraviesan esta platina, y permiten la extracción del aire por una máquina Carré, la medida de la presión con un manómetro y la alimentación continua del glóbulo calentado. Un termómetro de depósito plano T, que se desliza rozando á lo largo del tapón de la campana, permite medir la temperatura del glóbulo.

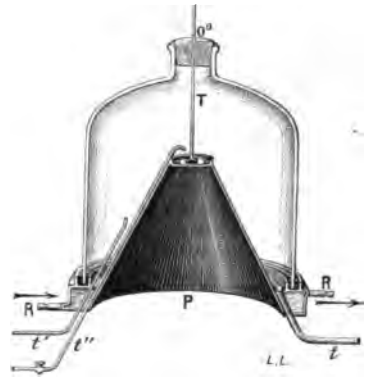


Fig. 607.

Llevando el enrarecimiento hasta 4 milímetros de mercurio, se ve que la gota de agua, por lo menos de 4 á 5 gramos, se vuelve opaca sobre el crisol incandescente, para acabar por congelarse totalmente en un trozo de hielo redondeado que se puede levantar con el termómetro, ó abandonar sobre la placa á su movimiento vibratorio muy ruidoso[1].

627. **Temperatura de las placas.** — La calefacción es tanto más fácil de realizar cuanto más caliente es la base. Observando con un anteojo el esferoide delante de una llama, se ve disminuir el intervalo luminoso á medida que la placa se enfría. Boutigny ha observado que el estado esferoidal en una placa de platino puede no cesar sino á 140° para el agua y á 134° para el alcohol.

Pero en placas de plata ó de oro que son susceptibles de más perfecto pulimento, se puede mantener este estado para el agua hasta 80°. Ya entonces no existe entre el líquido y su soporte la diferencia de temperatura que se *creía característica de la calefacción*, y el esferoide, en vez de entrar en ebullición en el momento del contacto, se extiende tranquilamente sobre la placa, pasando de una forma capilar á otra, de un ángulo de empalme de 180° á otro pequeñísimo.

628. **Explicación del estado esferoidal.** — Para explicar todos estos hechos se puede admitir que el glóbulo líquido se encuentra sostenido á distancia del soporte por la tensión del vapor que se produce continuamente en su superficie.

Este colchoncillo de vapor debe en consecuencia aislar la gota líquida por completo en el espacio, sustrayéndola á toda acción molecular del soporte y dándole así su forma tipo.

Por otra parte, el líquido no se calienta por contacto, sino únicamente por radiación; como es *diatermano*, quiere decir, transparente para los rayos emitidos de un foco incandescente, gran parte del calor radiante lo atraviesa sin calentarlo, de modo que se evapora muy lentamente. Esta evaporación completamente superficial, que absorbe ese débil grado de calor, mantiene al líquido en equilibrio, á temperatura algo inferior á la que produciría una evaporación interior, esto es, la ebullición.

Esta evaporación continua es la que produce entre el soporte y el líquido repulsión tanto más intensa cuanto más elevada es la temperatura de la placa.

Pero esta temperatura elevada no es necesaria, y se concibe que dada la es-

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 9 Mayo, 1887.

casa distancia á que se ejercen las acciones moleculares, pueda una capa de vapor excesivamente delgada ser bastante á proteger los esferoides contra la atracción de la placa y su calor de conductibilidad, si en ella no hay asperezas. De ahí su conservación sobre una placa bien pulimentada á temperatura relativamente baja; de ahí también la posibilidad de hacer rodar á temperatura ordinaria gotas de un líquido sobre otro líquido de análoga naturaleza, y la imposibilidad de hacerlas rodar sobre un líquido de naturaleza diferente, porque en el primer caso hay conservación, y en el segundo destrucción inmediata del colchoncillo de vapor protector de las gotas.

Como estas gotas rodantes son enteramente idénticas á las de las placas incandescentes, en su forma y en la causa de su producción, se ve que la gran calefacción del soporte no es una condición necesaria del estado esferoidal; la emisión de vapor por el líquido no es tampoco una condición indispensable y el estado esferoidal puede realizarse en una atmósfera líquida. Si se deposita una ancha gota de mercurio sobre una placa de oro bien pulimentada, introducida en alcohol que la moje bien, esta gota permanecerá separada del oro por una delgada capa de alcohol, pues el oro no es atacado, y se puede repetir con esa gota y esa placa la experiencia de Poggendorff.

De esta manera se tiene, pues, por vía húmeda el ángulo esferoidal, con el ángulo de empalme nulo, el grueso considerable y la forma de los esferoides de Boutigny. Esto se explica por la constancia de la tensión superficial en toda la superficie mercurio-alcohol que envuelve la gota y que adquiere curvatura continuamente creciente de arriba abajo.

Lo que caracteriza el estado esferoidal parece ser, por consiguiente, *una forma capilar* especial, que se produce cada vez que una pequeña masa líquida está completamente rodeada por un fluido (vapor ó líquido), donde adquiere *tensión superficial constante*[1]

CAPÍTULO IX

LIQUEFACCIÓN Y SOLIDIFICACIÓN DE LOS GASES Y DE LOS VAPORES.

629. **Historia. — Distintos procedimientos.** — Como los gases no son más que vapores muy alejados de su punto de saturación, es posible convertirlos en líquidos, lo mismo que á éstos.

Tubo de Faraday. — Davy y Faraday fueron los primeros que liquidaron gran número de gases considerados hasta entonces como permanentes. Su método consistía en encerrar dentro de un tubo de vidrio encorvado á manera de sifón, llamado *tubo de Faraday* (fig. 608), sustancias que, por su reacción química dan origen al gas que se trata de comprimir; de manera que, hallándose contenidas estas sustancias en una de las ramas del sifón, á medida que el gas se desprende va á comprimirse á sí mismo y á liquidarse en la otra rama, que se encuentra sumergida en una mezcla frigorífica. Los indicados físicos liquidaron de esta manera el cloro, el ácido sulfhídrico, el amoniaco y el ácido carbónico.

Liquefacción del ácido carbónico. — Aparato de Thilorier. — El ácido carbónico puede ser reducido al estado líquido únicamente por

1. Em. Gossart, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 26 Octubre 1891.

considerable presión. Así es qué la operación exige aparatos especiales, de considerable solidez. El primer aparato de este género fué imaginado por Thilorier; puede considerársele como un perfeccionamiento directo del tubo de Faraday [1].

El ácido carbónico líquido es un producto muy móvil, incoloro

Fig. 608.

y sumamente volátil. La tensión máxima de los vapores que emite á la temperatura de 15° sube á 50 atmósferas.

El frío producido por esta evaporación debe en consecuencia ser considerable y, en efecto, el enfriamiento que de ahí resulta basta para provocar la solidificación de una porción del líquido, cuando se le hace evaporar en una caja especial, ideada por Faraday, y muy perfeccionada por Cailletet. Entonces el ácido sólido se presenta bajo el aspecto de copos blancos filamentosos que no se evaporizan en el aire sino con mucha lentitud. En este momento se puede observar, por medio de un termómetro de alcohol, que su temperatura es de — 78° próximamente.

Experiencias recientes. — Después de Thilorier estudiaron la liquefacción y solidificación de los gases varios físicos, entre otros Colladon, Natterer, Berthelot, Andrews y Melsens; pero seis de estos cuerpos (el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno, el bióxido de nitrógeno, el óxido de carbono y el hidrógeno protocarbonado) habían resistido á todas las tentativas, cuando á fines de 1877 lograron

1. No lo describiremos, á pesar de su antigua celebridad, porque desde los trabajos recientes, no tiene en realidad más que un interés histórico.

simultáneamente Cailletet en Chatillón del Sena y Pictet en Ginebra, por medio de aparatos diferentes, liquidar los seis gases que llamaban *permanentes*. Wroblewski y Olszewski obtuvieron más tarde, en 1883, resultados aun mejores.

Observación. — Uno de los resultados prácticos más interesantes, es que hoy se venden en el comercio á precio muy bajo, gases liquidados, tales como el cloruro de metilo, el ácido sulfuroso y el ácido carbónico. Estos líquidos se encuentran dentro de cilindros de fundición ó de acero, cerrados por llaves de tornillo. El ácido carbónico líquido se fabrica actualmente en Alemania, cerca de Berlín. Se expende en grandes tubos de acero, que contienen hasta 8 kilogramos de dicho cuerpo.

630. **Experiencias de Cailletet.** — 1°. *Principio del método.* — En el aparato de Thilorier y en el de Faraday se comprime el gas á sí mismo, al producirse en un recipiente cerrado. En el notable de

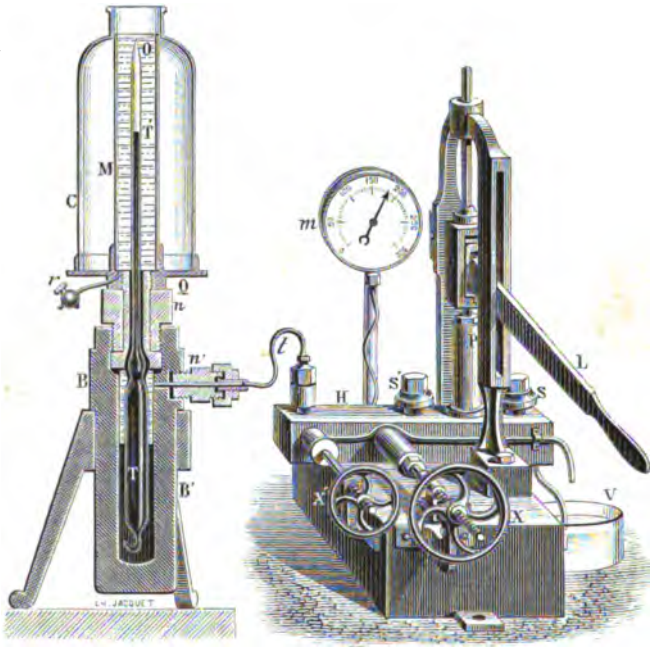


Fig. 609.

Cailletet la presión se obtiene por un medio mecánico. El método de compresión se había empleado ya antes, pero el de enfriamiento, que consiste en utilizar el frío obtenido por la *expansión misma* del gas comprimido, es tan nuevo como original.

2°. *Descripción del aparato.* — El aparato se compone de una cuba de hierro forjado BB' (fig. 609), medio llena de mercurio. En este líquido penetra una probeta TO, cuya parte superior, capilar y cerrada, contiene el gas que se trata de liquidar; la parte inferior es abierta y de mayor diámetro. Esta probeta se encuentra mantenida por una tuerca *n*, pegándola con cola marina. En un lado de la cuba B hay otra tuerca *n'*, taladrada por un conducto donde está fijo el tubo *t*, que conduce agua impelida por una bomba P. Las válvulas de ésta, que son una aspirante y otra impelente, se encuentran debajo de las tuercas S y S'. Un émbolo de inmersión de tornillo, gobernado por un volante X, sirve para forzar la presión, mientras que una llave, movida por un volante X', permite dar expansión al gas comprimido. Por fin, un manómetro *m*, colocado en la caja H, marca las presiones.

Para llenar de gas la probeta TO, se la dispone horizontalmente (fig. 610) y cuando la extremidad O no está cerrada todavía, se hace llegar el gas, perfectamente puro y seco, por un tubo de caucho *b*, aplicado en el otro extremo. Cuando se ha expulsado todo el aire, se suelda con la lámpara la extremidad O; entonces se levanta la probeta verticalmente y una gotecilla de mercurio *a*, introducida de antemano, va á cerrar el orificio interior. En este estado, se introduce la pro-

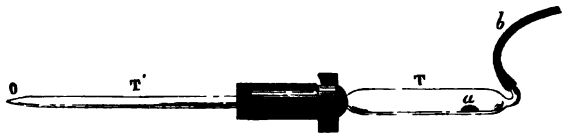


Fig. 610.

beta en la cuba BB', se aprieta fuertemente la tuerca *n* y se atornilla encima una platina Q, que sostiene un mango M, lleno de agua fría ó de una mezcla frigorífica. Para contener los pedazos de vidrio que serían lanzados si reventara la probeta, se cubre todo con una campana de cristal C; además, se colocan debajo de ésta materias secantes para impedir el depósito de escarcha que se produciría en el mango, cuando éste contiene una mezcla frigorífica.

3°. *Operación.* — Ahora está el aparato en disposición de funcionar y si se pone en marcha la bomba hidráulica por medio de la palanca L, el agua aspirada del vaso V é impelida por el tubo *t* comprime al mercurio en la cuba y lo hace subir hasta la parte capilar de la probeta. La presión puede llegar por de pronto hasta 400 *atmósferas*, y después hasta 2500, cuando se pone en acción el émbolo inmersor X.

Por de pronto no se observa ningún cambio en el estado del gas comprimido; pero cuando se llega á cierta presión, — que es diferente según el gas y la temperatura, — se ve correr un depósito líquido por la pared interior de la probeta y aglomerarse sobre el menisco del mercurio; á partir de este momento, el manómetro marca presión constante, que es la tensión máxima del gas liquidado.

4°. *Resultados.* — Cailletet redujo de esta manera á líquido el acetileno y el bióxido de nitrógeno; pero el óxido de carbono, el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno persistieron á la temperatura de — 29°, resistiendo presiones de 300 atmósferas.

Uso de la expansión. — Entonces precisa recurrir al enfriamiento que acompaña la expansión brusca de un gas comprimido. Si se abre la llave movida por el volante X', como la presión baja de repente á una atmósfera, el gas se dilata instantáneamente en el tubo O, produciendo un descenso de temperatura de unos 200° por bajo del punto de partida. Entonces se ve producirse en la probeta una neblina más ó menos densa, lo cual es signo de una liquidación parcial del

gas. De este modo redujo Cailletet á líquido el hidrógeno protocarbonado, el óxido de carbono, el oxígeno y el nitrógeno, bajo presión que antes de la expansión era de 300 atmósferas; pero en las mismas condiciones no produjo el hidrógeno sino ligera neblina, único indicio de un comienzo de liquefacción.

631. **Experiencias de Raúl Pictet.** — El aparato de Raúl Pictet no tiene la sencillez del de Cailletet; pero es incomparablemente más poderoso, pues reune á enormes presiones frío considerable. El gas se comprime á sí mismo al producirse en un vaso cerrado, lo mismo que en el aparato de Thilorier. Cuanto al enfriamiento, se le empieza por medio de una vaporización continua de ácido sulforoso líquido, se le aumenta por una vaporización de ácido carbónico ó de protóxido de nitrógeno, previamente liquidados por el ácido sulfuroso, y finalmente se le termina por la expansión del gas comprimido con que se experimenta.

632. **Experiencias de Wroblewski y Olszewski.** — 1°. *Principio del método.* — Al comprimir Cailletet el oxígeno y enfriarlo hasta — 100° en el etileno líquido, observó el fenómeno siguiente : en el momento de la expansión, se produce una expansión tumultuosa, que persiste durante tiempo apreciable ; es parecida á la proyección de un líquido en la parte fría del tubo. Por lo demás, ese físico indicó el medio de obtener liquefacción más completa, produciendo una temperatura aún más baja por la evaporación del etileno líquido.

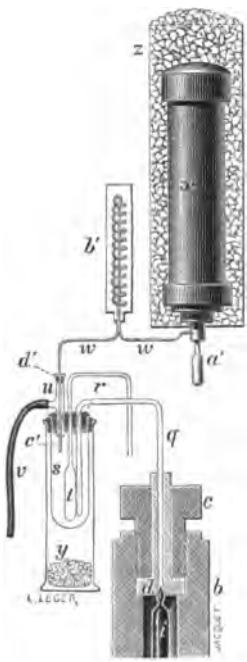


Fig. 611.

Precisamente este es el recurso que adoptaron en 1883 [1] Wroblewski y Olszewski. Haciendo el vacío sobre etileno líquido (según practicó antes Faraday al ocuparse del protóxido de nitrógeno), obtuvieron una temperatura de — 136° (medida con el termómetro de hidrógeno).

2°. *Aparato.* — Finalmente, habiendo sometido los gases permanentes á estas bajas temperaturas en una especie de aparato Cailletet (fig. 611) dispuesto de modo que comprimía hasta algunas centenas de atmósferas cantidades relativamente considerables de gas, liquidaron completamente, y con mucha facilidad, primero el oxígeno y después el nitrógeno y el óxido de carbono.

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 16 abril 1883.

El gas que se trata de liquidar está contenido en la rama *qr*; puede ser comprimido por medio de una bomba Cailletet, dispuesta en el montante *bc*. La evaporación del etileno líquido se efectúa en la probeta *s*, que comunica con una máquina neumática Bianchi por el tubo de plomo *v*. El etileno líquido está contenido en el depósito *x*, rodeado por una mezcla de hielo y de sal. Llega á *s* por pequeñas aberturas laterales practicadas en la extremidad *c'* del tubo *ww*, cuya porción *b'* esta metida en una pasta formada de ácido carbónico sólido y de éter. En el fondo de la probeta de pie *y* hay cloruro de calcio, que tiene por objeto evitar todo depósito de rocío en *s*, de modo que sea posible ver cuanto ocurre en el tubo de gas; *t* es un termómetro de hidrógeno que da indicaciones sobre las temperaturas alcanzadas.

3°. *Resultados.* — El oxígeno líquido es *incoloro y transparente* como el ácido carbónico. Es muy móvil y forma un menisco bien determinado [1].

La liquefacción del nitrógeno se obtuvo menos fácilmente. Habiéndosele enfriado dentro de un tubo de vidrio á — 136°, comprimiéndolo hasta 150 atmósferas, no se liquidó. Pero si en ese momento se producía *lentamente* la expansión y si al disminuir la presión no se bajaba de 50 atmósferas, el *nitrógeno se liquidaba por completo.*

Este líquido es *incoloro* y *transparente*, como el oxígeno y el ácido carbónico. Al principio presenta un menisco perfectamente distinto, pero se evapora con tal rapidez que en estado estático sólo son estables los líquidos *durante algunos segundos.* Para conservarlo líquido más tiempo habría que mantenerlo probablemente á temperatura inferior á — 136°

Por fin, el óxido de carbono se liquidó en las mismas condiciones que el nitrógeno. El líquido era incoloro, y el menisco muy visible (21 Abril 1883).

633. **Temperatura crítica de los gases. — Experiencia de Andrews.** — En otra época se admitía que, fuera cual fuese la temperatura de un gas, siempre existía presión bajo la cual se convertía en líquido; todo estribaba en alcanzar esa presión.

Pero los experimentos efectuados por Andrews con el ácido carbónico en 1869 condujeron á la conclusión de que *existe una temperatura por encima de la cual es imposible toda liquefacción, sea cual fuere la presión.* Esta es la que se denomina *temperatura crítica.*

Este físico comprimía el ácido carbónico en un tubo formado de una parte capilar de 1,25 mm. de diámetro y de otro más ancho (2,5 mm.). El gas puro estaba contenido en la parte capilar y parcialmente en el tubo más ancho donde se le encerraba por medio de un índice de mercurio. La parte capilar del tubo de gas era la única que surgía del aparato y que podía ser elevada á temperaturas conocidas por medio de un baño de agua. Supongamos que se comprima el gas *á temperatura constante*, por ejemplo á 13°,1. Cuando aumentaba la presión, disminuía el volumen gaseoso. La liquefacción empezaba bajo la presión de 48^{atm},9, y entonces se observaba una brusca disminución de volumen AB, según indica la

1. El *punto crítico* del oxígeno está por debajo de la temperatura de ebullición del etileno á la presión atmosférica: por esto no lo obtuvo Cailletet sino uniendo al frío que resulta de la evaporación del etileno el que produce la expansión.

figura 612. Después se comprimía el *gas liquidado* cuya compresibilidad es mucho menor que la del *gas*.

Á 21°,5 ocurren los mismos fenómenos, pero la liquefacción se retrasa (61 atm) y corresponde á una disminución de volumen menor A' B'. Al subir aún más la temperatura, el punto de liquefacción retrocede cada vez más y la disminución de volumen tiende hacia cero. El menisco va perdiendo más y más su curvatura hasta volverse plano, indeciso y desaparecer cuando la temperatura se acerca á 31°. Algo por encima, ejemplo á 32°,5, ya no hay liquefacción, en el sentido de que la isoterma no presenta ya parte rectilínea ninguna; lo mismo ocurre con todas las temperaturas superiores á 30°,92, que es la *temperatura crítica* del ácido carbónico (véase la definición de las *líneas isotermas*, 725, III).

La *presión crítica* es el límite hacia el cual tiende la presión del vapor saturado cuando la temperatura tiende hacia la temperatura crítica : si se considera la unidad de masa de un cuerpo, su *volumen crítico* es el volumen que ocupa á la temperatura crítica y bajo la presión crítica, y su *densidad crítica* es su densidad referida al agua á 4°. Entonces se dice que este cuerpo se encuentra en su *punto crítico* C.

Los numerosos experimentos realizados con posterioridad á Andrews han confirmado sus conclusiones probando que son absolutamente generales; así es que hoy se conocen los *elementos críticos* de numerosísimos cuerpos simples ó compuestos. Limitándonos al oxígeno, el punto crítico es — 118°, la presión crítica 50 atmósferas y la densidad crítica 0,405.

Observación. — 1°. *Curva crítica.* — El lugar de los puntos A y B (fig. 612) es una curva que ha recibido el nombre de *curva crítica*. Cada vez que el punto M, representativo del estado del fluido, cae por dentro de esta línea, el fluido se halla parcialmente en estado líquido y parcialmente en el de vapor saturado. Por fuera, en GA ó BL, afecta por el contrario estado perfectamente homogéneo. Se puede ir del estado P, que pertenece á la isoterma del gas, al estado Q, que pertenece á un isotermo líquido BL, pasando por una serie de estados homogéneos PC'Q. La homogeneidad cesa si el ciclo de los estados sucesivos de la masa fluida encuentra la curva crítica. Si se trata de la unidad de masa del fluido, la parte rectilínea AB representa la diferencia de los volúmenes específicos u' — u del vapor saturado y del líquido á la temperatura t, la ordenada Df es la fuerza elástica máxima del vapor á la misma temperatura.

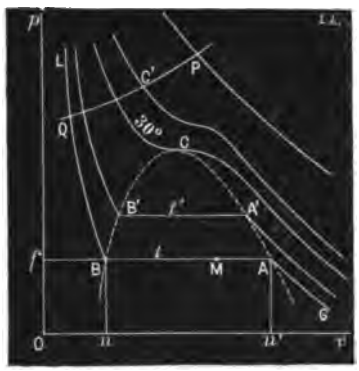


Fig. 612.

2°. *Distinción teórica de un gas y de un vapor.* — Las experiencias de Andrews permiten precisar la noción, bastante vaga en otro tiempo, de *gas* y de *vapor*. Puede decirse con él que un cuerpo gaseoso es un gas por encima de la temperatura crítica, y por debajo un vapor. En consecuencia, un vapor puede liquidarse sólo por la presión; un gas no puede convertirse en líquido sin la ayuda de un descenso de temperatura. Así, el ácido carbónico es *un gas* por encima de 30°,92, y *un vapor* por debajo de esta temperatura.

634. **Explicación del punto crítico.** — 1°. *Teoría de Jamin.* — Jamin comprende el hecho experimental del *punto crítico* en la ley general de la vaporización.

Sea un líquido en presencia de su vapor saturado en un vaso cuyo volumen varía poco bajo la influencia del calor. Á medida que sube la temperatura, la densidad del líquido disminuye cada vez más; por el contrario, la densidad del vapor saturado aumenta rápidamente y de manera continua. Luego, á cierta temperatura estas dos densidades deben hacerse iguales. De modo que la temperatura crítica viene á ser *aquella en que un líquido y su vapor saturado tienen la misma densidad.* Efectivamente, en ese momento el vapor no tiende ya á ocupar

la parte superior, ni el líquido la inferior; la superficie de separación debe cesar de ser distinta, mezclándose luego la masa con estrías undosas y cambiantes, y al fin hacerse todo homogéneo.

Hasta aquí puede decirse que la teoría de Jamin está enteramente acorde con la experiencia. La igualdad de las dos clases de densidades á la temperatura crítica es en particular demostrada por el hecho de que en las isotermas de Andrews, supuestas en número infinito, la que corresponde á la temperatura crítica posee en el punto que corresponde á la presión crítica una tangente horizontal que es el límite de las partes rectilíneas de las demás isotermas. De manera que la igualdad de las densidades es, por decirlo así la definición del punto crítico en esta representación gráfica. Por lo demás, desde el punto de vista experimental, los físicos que han estudiado la variación de las dos densidades en las inmediaciones de la temperatura crítica, Cailletet y Mathias, Batelli, Amagat, y S. Young han llegado á la misma conclusión.

Pero donde deja de ser exacta la teoría de Jamin es cuando admite que si el estado líquido persiste más allá de la temperatura crítica, la disminución de densidad del líquido por la dilatación debe continuar más allá de la temperatura crítica, así como el aumento de la densidad de vapor saturado. Luego, comprimiendo suficientemente el gas por encima de la temperatura crítica se debería reunir el líquido en la parte superior del vaso y obtener la inversión del menisco. La experiencia no ha confirmado esta previsión (Cailletet).

2°. *Vaporización total.* — Hay que tener cuidado de no confundir la temperatura crítica T_c, definida por las isotermas de Andrews y la igualdad de las dos densidades con la temperatura t_c á que ocurre la *vaporización total*, quiere decir, la desaparición del menisco de un líquido calentado, en presencia de su vapor, en un espacio sensiblemente doble del volumen inicial del líquido. Según han demostrado Pellat, Galitzine y Stoletow, la temperatura t_c es inferior á T_c en algunos décimos de grado.

635. **Curva de las densidades.** — Supongamos que se haya determinado experimentalmente para un cuerpo la densidad del líquido y la del vapor saturado y esto hasta la temperatura crítica T_c. Marquemos en ordenadas estas dos clases de densidades y en abscisas las temperaturas; según lo que antecede. las dos curvas A y B (fig. 613) deberán *empalmarse*, para la temperatura crítica, en un punto C donde la tangente es paralela al eje de las ordenadas. La curva ACB, considerada como curva única, es la *curva de las densidades.* Como las experiencias de Cailletet y Mathias lo han probado, tiene sensiblemente la forma de una parábola cuyo eje se incline apenas sobre el de las abscisas. En particular, el lugar geométrico de los puntos medios de las cuerdas paralelas al eje de las ordenadas es una recta. Este hecho ha sido confirmado poco hace por Amagat.

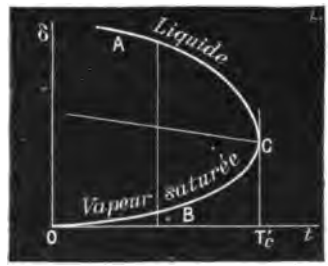


Fig. 613.

Mathias ha probado además que la densidad crítica de un cuerpo es muy sensiblemente igual al tercio de la densidad del líquido tomada á la temperatura más distante de la temperatura crítica.

La experiencia prueba que el coeficiente angular del diámetro rectilíneo es siempre negativo; de ahí se sigue que en el mismo intervalo de temperatura, la variación absoluta de la densidad del líquido es siempre mayor que la del vapor saturado.

636. **Leyes de los estados correspondientes.** — Débese á Van der Waals un conjunto de leyes notables; ese físico las enunció como consecuencia de una fórmula célebre que expuso para representar las isotermas de la experiencia de Andrews.

Sean p, v, t, la presión, el volumen y la temperatura centígrada de la unidad de peso de un fluido cuyas constantes críticas correspondiente son π, ς y θ. Digamos con Van der Waals

$$p = \iota\pi, \qquad v = n\varsigma, \qquad 273 + t = T = \Theta = m\,(273 + \theta),$$

esto es, midamos p, v y T, *tomando como unidades las constantes críticas.* Admitido esto, tomemos dos cuerpos definidos por

$$\pi, \varphi, \theta \quad \text{y} \quad \pi', \varphi', \theta'.$$

Diremos que las presiones p y p' son *correspondientes* si se tiene

$$p = \varepsilon\pi, \quad p' = \varepsilon\pi' \quad \text{ó} \quad \frac{p}{p'} = \frac{\pi}{\pi'}.$$

Los volúmenes v, v' serán *correspondientes* si se tiene

$$v = n\varphi, \quad v' = n\varphi' \quad \text{ó} \quad \frac{v}{v'} = \frac{\varphi}{\varphi'}.$$

Las temperaturas $T = 273 + t$, $T' = 273 + t'$ serán *correspondientes* si se tiene

$$T = m\theta, \quad T' = m\theta', \quad \text{ó} \quad \frac{T}{T'} = \frac{\theta}{\theta'}.$$

Admitido esto, las *leyes de los estados correspondientes* pueden enunciarse así *Si se consideran varios cuerpos á temperaturas correspondientes :*

1°. *Sus presiones de vapor saturado son correspondientes ;*

2°. *Sus densidades de líquido son correspondientes ;*

3°. *Sus densidades de vapor saturado son correspondientes.*

La primera ley ha sido demostrada por Van der Waals con las presiones de vapor saturado de éter y de ácido sulfuroso, determinadas por Sajotchewski.

La ley relativa á la densidad de los líquidos ha sido objeto de demostraciones particularmente convincentes por parte de Mathias y de Sydney Young. Los experimentos de este último físico prueban que la teoría de los estados correspondientes es generalmente aplicable á estas densidades en toda la extensión del estado líquido, de manera que, conociendo la densidad crítica de un primer cuerpo, se puede calcular la de otro por una simple proporción, conociendo dos densidades de líquido correspondientes.

La ley relativa á la densidad de vapor saturado es la que se demuestra menos bien; sólo es exacta cuando no nos apartamos demasiado de la temperatura crítica.

De la discusión de los resultados de S. Young efectuada por Mathias resulta que el teorema de los estados correspondientes no puede aplicarse á todos los cuerpos considerados en conjunto : pero si se les agrupa en series, el teorema conserva todo su valor para los diversos cuerpos de una misma serie.

CAPÍTULO X

DENSIDADES DE LOS VAPORES. — MEZCLA DE LOS GASES Y DE LOS VAPORES.

637. **Densidad de los vapores secos. — Métodos de determinación.** — Llámase *densidad de un vapor seco* al cociente que existe entre el peso de cierto volumen de este vapor no saturado y el de un mismo volumen de aire, tomados á la misma temperatura y bajo la misma presión.

Se emplean dos métodos principales para determinar las densidades de los vapores secos : el primero, debido á Gay-Lussac, es

aplicable á los líquidos que entran en ebullición por debajo de 100° y algo por encima ; el segundo, debido á Dumas, permite operar á temperaturas que pueden llegar hasta 360° próximamente.

Ambas se fundan en la aplicación de la fórmula

$$P = V \,.\, 1^{gr},293 \times D \,.\, \frac{F}{760} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t},$$

que da el peso de un volumen V de vapor, cuya densidad es D, la temperatura t y la fuerza elástica F. En el primer método, *se indica de antemano* P, *se miden* V y F *experimentalmente*, y *se calcula* D *por la fórmula*. En el segundo método *se da de antemano* V y F, *se mide* P *por la experiencia y se calcula* D *por la fórmula*.

638. **Método de Gay-Lussac : Procedimiento de Hofmann.** — Hofmann ha aplicado el método de Gay-Lussac por un procedimiento muy ventajoso desde el punto de vista de la sencillez de la manipulación, así como de la precisión de las medidas.

1°. *Aparato.* — El aparato se reduce á un largo tubo, cerrado por un extremo, de 1 metro de alto y de 2 centímetros de diámetro : está graduado dos veces en toda su longitud, una en *centímetros cúbicos* y otra en *milímetros* (fig. 614). Está lleno de mercurio y fijo verticalmente, como un tubo de Torricelli, en una pequeña cuba de mercurio.

2°. *Operación.* — Introdúcese en el aparato un peso conocido P de la materia volátil, contenido en una pequeña ampolla A tapada al esmeril (fig. 614). El sistema de calefacción es al mismo tiempo más cómodo y más preciso que el de Gay-Lussac : un mango de vidrio, fijo por medio de un tapón á algunos centímetros por encima del orificio del tubo, permite hacer circular en torno de éste el vapor de un líquido á punto de ebullición conocido, tal como el agua, el alcohol amílico, la anjlina. Cuando se ha roto la ampolla y se ha volatilizado completamente su contenido líquido, y cuando la columna vertical toma nivel fijo, sólo falta anotar el volumen aparente ocupado por el vapor, de donde se deduce V, la presión atmosférica del momento, y la altura h de la columna levantada, de donde se deduce F(= H — h). No hay que preocuparse de la temperatura t : es la del vapor que llena el mango exterior.

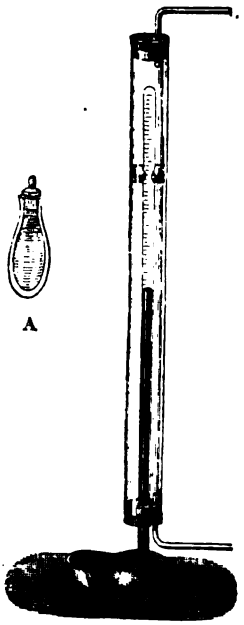


Fig. 614.

3°. *Cálculo.* — Conócense, pues, todos los coeficientes que entran en la fórmula : sólo falta obtener D por el cálculo.

Observaciones.— 1°. En el caso de que las densidades del vapor sean muy pequeñas, el procedimiento de Hofmann carece de sensibilidad : el peso de gas que llena el espacio es demasiado pequeño por causa del escaso volumen.

2°. *Procedimiento de Troost.* — Puede dársele sensibilidad añadiendo al tubo de Hofmann un ensanche según ha hecho Troost.

3°. El método de Hofmann, lo mismo que el de Gay-Lussac, no es aplicable á los líquidos cuyo punto de ebullición pasa de 160°, 150° y aún 100°, pues por encima de esta temperatura la tensión de vapor del mercurio de la campana ya no es despreciable. Es posible ponerse á cubierto de esta causa de error restando de la tensión F medida, la tensión máxima del vapor de mercurio que corresponde á la temperatura de la experiencia.

639. **Método de Dumas.** — 1°. *Aparato y operación.* — El aparato adoptado por Dumas consiste simplemente en un matraz de vidrio de medio litro de cabida próximamente, cuya garganta se ha estirado en forma de punta afilada (fig. 615).

Fig. 615.

2°. *Pesada del aire.* — Después de secarlo por dentro y por fuera, se le pesa primero lleno de aire seco, á la presión H y á la temperatura ambiente t; después, una vez que se introduce el líquido cuya densidad de vapor se busca, se le reduce á vapores introduciendo el matraz en un baño de temperatura suficientemente elevada, donde se le mantiene por medio de un dispositivo especial indicado en la figura 615. Caliéntase hasta más allá de la temperatura de ebullición de la sustancia que está en experiencia. El vapor al desprenderse expulsa el aire contenido en el aparato. En el momento de cesar el chorro, se cierra con el soplete la punta afilada del matraz, teniendo cuidado de tomar nota immediatamente de la temperatura del baño y de la altura H del barómetro. Por fin, cuando se ha enfriado el matraz y una vez que se le ha limpiado cuidadosamente, se le pesa de nuevo. Sea Q el exceso de la segunda pesada sobre la primera: este número representa el exceso de peso del vapor contenido en el matraz á la temperatnra t y á la presión H, sobre el peso del aire contenido allí primitivamente.

3°. *Aforo del matraz.* — Hay que conocer el volumen del matraz á 0°. Este aforo accesorio se efectúa después de la operación principal. Introdúcese la punta afilada en el mercurio y se rompe con unas pinzas la extremidad. Como el vapor se ha condensado, hase producido el vacío en el matraz, y el mercurio, rechazado por la presión atmosférica, lo llena completamente si se ha expulsado de él todo el aire. El volumen del matraz á la temperatura ambiente se determina echando después en una campana graduada el mercurio que entró en el matraz.

4°. *Cálculo de la experiencia.* — Por el cálculo se deduce su volumen V á cero, y después el peso P′ del aire contenido en el matraz á la temperatura t y á la presión H (567). El peso P del vapor contenido en el matraz á t grados, y bajo la presión H′, es por tanto $P'+Q$. Conociendo P, que es igual á H, F, V y t sólo falta resolver la fórmula con relación á D.

5°. Observaciones. — I. Si quedara aire en el matraz después que se ha introducido mercurio, aquél no se llenaría completamente, pero esto no quita para que el volumen del mercurio introducido represente el volumen del vapor. Sin

embargo, habría que aforar el volumen de aire que queda en el matraz, haciéndolo penetrar en una campana graduada, y tener en cuenta su peso. Sea v el volumen de este residuo de aire, *referido á la presión* H y á la temperatura t; de ahí se deduce fácilmente su peso p por la fórmula conocida. La corrección consiste en restar p del peso total P del vapor.

II. El método suministra resultados muy exactos, pero tiene en la práctica el inconveniente de exigir una cantidad bastante grande (25 ó 30 gr.) de sustancia; ahora bien, no siempre es fácil procurarse dosis tan grande de ciertos productos. Por lo demás, cuando la sustancia empleada es rara, puede conservársela: entonces se usa un dispositivo que permite condensar y recoger el exceso de vapor expulsado del matraz por la ebullición.

640. **Densidades de los vapores saturados.** — Anteriormente se ha visto que el vapor saturado de un cuerpo está enteramente definido por su temperatura, pues su presión no depende de otra variable[1]. No hay, pues, para qué considerar la densidad de estos vapores comparada con la del aire; así es que se determina simplemente el peso específico absoluto de estos vapores, quiere decir el de un centímetro cúbico expresado en gramos, ó mejor aun su *volumen* específico, quiere decir, el volumen en centímetros cúbicos de un gramo de vapor saturado.

Si para un cuerpo dado es p el peso en gramos de v centímetros cúbicos de vapor saturado á la temperatura t, existe una relación $f(p, v, t) = 0$ entre estas tres cantidades; si se dan dos de ellas, la tercera queda determinada; de donde se deduce el peso específico $\frac{p}{v}$ del vapor saturado á la temperatura t, ó el volumen específico $\frac{v}{p}$.

En consecuencia, hay tres métodos para determinar el volumen específico de los vapores saturados:

1°. Se da t y p y se averigua v; es el método de Gay-Lussac aplicado á los vapores saturados.

2°. Se da t y v, y se busca p; es el método de Dumas aplicado á los vapores saturados.

3°. Se da p y v, y se busca t; este es el método de Fairbairn y de Tate.

Experiencias de Perot. — El segundo método ha sido aplicado por Perot. Consiste en producir una atmósfera de vapor, saturado, á temperatura conocida, en un espacio libre de aire y que contenga un matraz B (fig. 616). Entonces este matraz se llena de vapor saturado, y basta cerrar para que se pueda por medio de pesadas determinar la masa del cuerpo que contiene y, en consecuencia, deducir el volumen específico de su vapor.

El espacio cerrado donde se produce el vapor saturado es el interior de una caldera de bronce CC, cerrada por una tapadera que mantienen varios pernos, y en la cual se puede hacer el vacío por un tubo de vidrio v, que pasa á través de un prensa-estopas. Dentro y sobre un soporte está un matraz cuyo peso se conoce, lleno de aire seco, como los que se emplean en el método de Dumas. Al lado se ve una ampolla a llena del líquido y cerrada con la lámpara. Después de hacer el vacío *seco*, se cierra con el soplete el tubo v, y se coloca la caldera en un baño de maría, E, agitado constantemente. La ampolla revienta y el vapor

1. Á menos que se consideren los vapores en presencia de su líquido dentro de tubos capilares.

saturado llena el matraz B; la temperatura se mantiene fija durante la última media hora y el matraz se cierra por medio de una corriente eléctrica cuyo circuito rodea el cuello. La experiencia termina como en el método de Dumas.

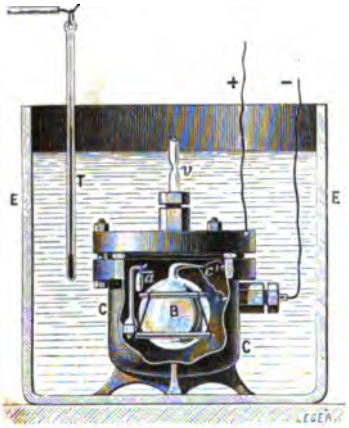


Fig. 616.

Este dispositivo no conviene á las temperaturas en que el vapor de agua ataca al vidrio, ni para los vapores saturados á gran presión.

Resultados. — La experiencia prueba que el peso específico absoluto δ del vapor saturado de un cuerpo es sensiblemente proporcional á $\frac{P}{1+\alpha t}$ cuando la presión es escasa, pero que después crece con mucha mayor rapidez de lo que exige la ley de Mariotte combinada con la de Gay-Lussac.

El peso específico δ crece, pues, con mucha rapidez en las inmediaciones de la temperatura crítica. Para las presiones inferiores ó iguales á la atmosférica, es posible al contrario calcular el valor de δ, mediante las leyes de Mariotte y de Gay-Lussac.

641. **Observación de E. Mathias sobre las densidades y los pesos específicos de los líquidos.** — En la definición de las densidades absolutas ó relativas se supone implícitamente (lo mismo pasa con los pesos específicos) que los cuerpos se consideran *bajo la presión de una atmósfera.* Se ha visto que la presión más pequeña bajo la cual puede permanecer un líquido *en equilibrio* á la temperatura t°, es la ejercida por su vapor saturado (*tensión máxima* á t°). Ahora bien, para la mayor parte de los líquidos usuales, agua, alcohol, éter, mercurio, etc., esta presión es muy inferior á una atmósfera; de ahí se sigue que las densidades determinadas de la manera ordinaria son las de *líquidos comprimidos.* Como los líquidos ordinarios son extremadamente poco compresibles (el coeficiente de compresibilidad del agua hacia 4° es de unos 0,00005 por 1 atmósfera), las densidades de los líquidos se alteran poco; pero, cosa más grave, lo son de manera muy diferente cuando se pasa de un cuerpo á otro, porque á la misma temperatura los diversos líquidos tienen presiones de vapor saturado muy diferentes. Por consiguiente, los líquidos no se encuentran en estado comparable y no pueden existir relaciones sencillas entre sus densidades consideradas así.

Por el contrario, la densidad de los líquidos tal como se introduce en las ecuaciones de la *termodinámica* es la densidad del líquido *bajo la presión de vapor saturado;* en estas condiciones, el estado líquido se encuentra perfectamente defidido por la temperatura *nada más* y todos los líquidos quedan en estado comparable.

Sería en consecuencia *más racional* completar la definición del estado líquido (en lo que se refiere á las densidades y pesos específicos) agregando que el líquido debe ser siempre considerado *bajo la presión de su vapor saturado.*

Esta juiciosa observación se debe á E. Mathias: aplicada al caso del agua, prueba que el máximum de densidad *verdadera* de este líquido se produce algunos centésimos de grado por encima del máximum *aparente* observado bajo la presión de la atmósfera, y que la densidad máxima absoluta (1,000013) de este líquido es demasiado grande en $\frac{1}{20000}$ próximamente, corrección *cuatro* veces mayor que la derivada del kilogramo-tipo de los Archivos.

MEZCLA DE LOS GASES Y DE LOS VAPORES.

642. **Mezcla de los gases y de los vapores. — Leyes de Dalton.** — Cuando los gases y los vapores carecen de acción química unos sobre

otros, se mezclan entre sí íntimamente como los gases. Este fenómeno se encuentra sometido á dos leyes, descubiertas por Dalton.

1°. *Cuando se produce un vapor en una atmósfera gaseosa, alcanza á la misma temperatura la misma tensión máxima que en el vacío.*

2°. *La fuerza elástica de la mezcla es igual á la suma de las fuerzas elásticas del gas y del vapor mezclados* (suponiendo que no haya variado el volumen primitivo).

Demostración experimental. — Estas leyes se demuestran por medio de un aparato debido á Gay-Lussac. Consiste en un tubo de vidrio A (fig. 617), masticado por sus dos extremos á dos llaves de hierro *b* y *d*; sobre la llave *d* hay un gollete lateral que pone en comunicación el tubo A con otro B de diámetro más pequeño; una escala colocada entre estos dos tubos permite medir la altura de las columnas de mercurio contenidas en cada uno de ellos.

Fig. 617.

Operación. — Una vez lleno de mercurio seco el tubo A y cerradas las llaves *b* y *d*, se atornilla en *b*, en lugar del embudo C, un matraz de vidrio M, cerrado á su vez por una llave y lleno de aire seco ó de cualquier otro gas. Abriendo después las tres llaves, se deja correr del tubo A parte del mercurio que es reemplazada por el aire seco del matraz. Ciérranse en este momento las llaves y se vuelve el aire encerrado en A á la presión atmosférica, echando mercurio en el tubo B, hasta que el nivel se encuentre á la misma altura en ambas ramas. Por fin, se reemplaza el matraz por el embudo C, provisto de una llave particular *a*, que se denomina *llave de cubeta* (fig. 617, *n*). Habiendo vertido en el embudo C el líquido que se trata de vaporizar, anotado el nivel *k* del mercurio y abierta la llave *b*, se vuelve la llave *a* de modo que su cavidad se llene; después se le invierte, á fin de que el líquido penetre en el espacio A, vaporizándose allí. De esta manera se continúa dejando caer el líquido gota á gota hasta que el aire del tubo este saturado de vapor: se reconoce que así es cuando el nivel del mercurio *k* deja de bajar.

1ª LEY. — Como la tensión del vapor que se ha producido en el espacio A se ha agregado á la del aire que antes había allí, el volumen

de gas ha crecido; vuélvesele á su valor inicial vertiendo de nuevo mercurio en el tubo B hasta el nivel primitivo *k*. Entonces se observa en los tudos B y A una diferencia de nivel B*o*, que representa la tensión del vapor producido. Ahora bien, si se hacen penetrar en el vacío de un tubo barométrico algunas gotas del mismo líquido volátil, se observa una depresión precisamente igual á B*o*: luego, *dada igualdad de temperatura, la tensión máxima del vapor saturado y, por consiguiente, su densidad, son idénticas en el vacío y en los gases.*

2ª LEY. — La segunda ley queda demostrada por la misma experiencia, pues cuando el mercurio ha recobrado su nivel *k*, la mezcla soporta la presión atmosférica que se ejerce en el vértice del tubo B, *más* el peso de la columna de mercurio B*o*. Ahora bien, estas dos presiones representan, una la del aire seco, y la otra la tensión del vapor. Por lo demás, esta segunda ley se deriva de la primera.

Crítica del aparato. — Experiencias de Regnault. — El aparato de Gay-Lussac no permite experimentar más que á la temperatura ordinaria; pero habiendo comparado sucesivamente Regnault en el aire y en el vacío las tensiones de los vapores de agua, de éter, de sulfuro de carbono y de bencina por medio de un aparato que puede ser elevado á distintas temperaturas, observó constantemente que *la tensión en el aire es menor que en el vacío.* Sin embargo, las diferencias son demasiado pequeñas para probar la inexactitud de la ley de Dalton; por esto pensaba Regnault que se debe considerarla como rigurosamente exacta y atribuir las pequeñas divergencias á una condensación continua del vapor, que se efectuaría en el vacío de manera no interrumpida, por causa de la propiedad higroscópica de esta sustancia.

643. **Fórmulas relativas á las mezclas de gas y de vapores.** — I. *Dado el volumen* V *ocupado por una masa de aire seco, bajo la presión* H, *se pregunta cuál pasará á ser su volumen* V' *cuando esté saturado de vapor de agua, permaneciendo constantes la temperatura y la presión.*

Si se representa por F la fuerza elástica del vapor que satura el aire, éste se encuentra sometido en la mezcla únicamente á la presión H — F (642,2°). Debe tenerse, pues, con arreglo á la ley de Mariotte.

$$VH = V'(H - F), \quad \text{de donde} \quad V' = V \cdot \frac{H}{H - F}.$$

II. *Dado el volumen de aire* V *ocupado por una masa de aire saturado bajo la presión* H *y á la temperatura* t *¿ cuál será su volumen* V', *siempre en estado de saturación, bajo la presión* H' *y á la temperatura* t' *?*

Si se representa por F la tensión máxima del vapor á t grados, y por F' la tensión máxima á t' grados, el aire seco, en cada una de las mezclas V y V', estará sometido respectivamente á las presiones H — F y H' — F'. Aplicando á la masa de gas en este caso la fórmula de los gases perfectos, se tiene la ecuación

$$\frac{V(H - F)}{1 + \alpha t} = \frac{V'(H' - F')}{1 + \alpha t'}, \quad \text{de donde} \quad V' = V \cdot \frac{H - F}{H' - F'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

III. *Se pregunta el peso* P *de un volumen de aire* V *saturado de vapor de agua, á la temperatura* t *y bajo la presión* H (*siendo* $\frac{5}{8}$ *la densidad del vapor*).

Observemos primero que el volumen V de aire saturado es en realidad una mezcla de V litros de aire seco á t grados, á la presión H menos la tensión del vapor, y de V litros de vapor saturado á t grados.

Ahora bien, si se representa por F la tensión del vapor, la presión del aire considerado solo será H — F, y el problema se reduce de esta manera á averiguar : 1°. el peso de V litros de aire seco á t grados y á la presión H — F ; 2°. el peso de V litros de vapor saturado á t grados y á la presión F : después bastará con sumar estos dos pesos.

Ahora bien, por una parte V litros de aire seco pesan (en gramos)

$$[1] \qquad V \times 1{,}293 \times \frac{H - F}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

y, por otra parte, los V litros de vapor pesan

$$[2] \qquad V \times 1{,}293 \times \frac{5}{8} \times \frac{F}{760} \times \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Por fin, efectuando la suma de los pesos [1] y [2], se tiene (en gramos)

$$P = \frac{1{,}293.\ V\,(H - F)}{(1 + \alpha t)\,760} + 1{,}293.\ V \times F \times \frac{5}{8} = V.\ 1{,}293.\ \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8} F}{760}$$

IV. *Aplicación : Razón entre un volumen de líquido y el de su vapor.* — Una vez conocida la densidad de un vapor se deduce de ella fácilmente el volumen que un peso conocido de este vapor debe ocupar, en estado de saturación, á una temperatura dada. Calculemos, por ejemplo, el volumen de 1 gramo de vapor de agua á 100° y bajo la presión 760 mm.

Según la fórmula [2], 1 litro de vapor saturado, á 100° y á la presión $0^m{,}76$, pesa (en gramos)

$$0{,}6235 \times 1{,}293 \times \frac{1}{1 + 100\,\alpha} = 0{,}5898.$$

Para obtener á la misma temperatura y presión el volumen V ocupado por 1 gramo de vapor, basta dividir 1 gramo por 0,5898 g ; tiénese

$$V = 1{,}695 \text{ litro} = 1695 \text{ cm}^3.$$

Ahora bien un gramo de agua á 100° ocupa un volumen algo menor de 1 centímetro cúbico : luego, al transformarse el agua en vapor á 100° y bajo la presión 760 mm, adquiere volumen unas 1700 veces mayor que en el estado líquido.

CAPÍTULO XI

HIGROMETRÍA.

644. **Definiciones preliminares.** — 1°. *Objeto de la higrometría.* — Llámase *higrometría* á la parte de la física que tiene por objeto determinar la proporción de vapor contenido, sea en la atmósfera, sea en un volumen de aire limitado.

El grado de humedad de la atmósfera no depende de la cantidad

absoluta de vapor de agua que contiene, sino de la tensión de este vapor. Cuando el aire se encuentra frío, puede estar muy húmedo con poco vapor, y por el contrario, muy seco con mayor cantidad cuando está caliente. Así, el aire contiene en general más vapor de agua en verano que en invierno, y sin embargo está menos húmedo, porque, como la temperatura es más elevada, el vapor se encuentra más distante de su punto de saturación. Análogamente, cuando se calienta un apartamento no se disminuye la cantidad de vapor que hay en el aire; pero sí la humedad de éste, porque se aleja su punto de saturación.

2°. *Estado higrométrico.* — Como en general no está el aire saturado, se llama *estado higrométrico*, ó *fracción de saturación* del aire á la razón de la cantidad actual de vapor de agua que contiene respecto de la que contendría á temperatura igual, si estuviera saturado.

Otra definición. — Como la ley de Mariotte se aplica á los vapores no saturados, resulta de ahí que, dada igualdad de temperatura y de volumen, el peso del vapor en un espacio no saturado varía proporcionalmente á la tensión de este mismo vapor. Es por tanto posible reemplazar la razón de las cantidades de vapor por la de las tensiones correspondientes, y definir el estado higrométrico del aire diciendo que es *la razón entre la tensión del vapor de agua que contiene y la tensión que tendría el vapor de agua á la misma temperatura si el aire se hallara saturado.*

Representando por f la tensión del vapor que hay en el aire, por F la del vapor saturado á la misma temperatura, y por e el estado higrométrico, se tiene

$$e = \frac{f}{F}, \quad \text{de donde} \quad f = F \times e.$$

3°. *Higrómetros.* — Se llama *higrómetros* á unos aparatos que sirven para determinar el estado higrométrico del aire. Se han imaginado gran número de ellos, que es posible referir á cuatro clases principales: los *higrómetros químicos*, los *higrómetros de absorción*, los *higrómetros de condensación*, y los *psicrómetros*.

645. **Higrómetro químico.** — El higrómetro químico es hablando en propiedad más bien un método particular de higrometría que un aparato.

Principio del método. — Consiste en hacer pasar un volumen conocido de aire por encima de una sustancia ávida de agua, por ejemplo, de cloruro de calcio. Habiendo pesado la sustancia antes del paso del aire y pesándola después, resulta un exceso de peso, que representa el vapor contenido en el aire.

Sean p este peso, V el volumen del aire que ha pasado por el tubo secante, t la temperatura, f la tensión actual del vapor, y 0,622 su densidad; tiénese

$$p = V\ 1{,}292.\ 0.622 \cdot \frac{1}{1 + \alpha\, t} \cdot \frac{f}{760}.$$

En esta ecuación está determinado todo directamente, excepto f que se deduce.

Operación. — Para hacer pasar á voluntad un volumen de aire más ó menos considerable, se utilizan dos depósitos de latón A y B (fig. 618), idénticos, que están fijos en un mismo eje alrededor del cual se les hace oscilar alternativamente. Además, comunican entre sí por medio de un conducto central, mientras que por otros dos practicados en el eje, están siempre en comunicación, el de-

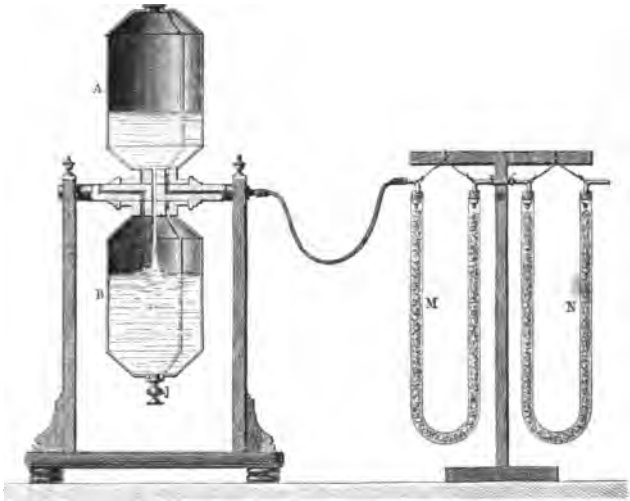


Fig. 618.

pósito inferior con la atmósfera y el superior, mediante un caño de goma elástica, con una serie de tubos M, N, llenos de cloruro de calcio ó de piedra pómez sulfúrica. El primero de estos tubos, N, está destinado á absorber el vapor de agua contenido en el aire aspirado; el segundo, M, detiene al vapor que se dirige de los depósitos al tubo N.

Una vez lleno de agua el depósito inferior y el superior de aire, se hace que el aparato se incline, de modo que el líquido corra lentamente desde A hacia B. Como el vacío se hace en A, el aire penetra por los tubos N, M, y abandona su vapor de agua en el primero. Cuando toda el agua ha corrido hacia B, se hace oscilar de nuevo el aparato: entonces vuelve á empezar la misma salida y es aspirado á través del tubo N el mismo volumen de aire. Si la capacidad de cada depósito es de 10 litros, y se ha inclinado cinco veces el aparato, por el tubo N habrán pasado, secándose en él, 50 litros de aire.

Cálculo del experimento. — El volumen de aire suministrado directamente por el aparato no es el que debe llevarse á la fórmula anterior. En efecto el aire que ha entrado en el aspirador se ha saturado allí de humedad á la temperatura t de la experiencia; de manera que ha adquirido la presión H — F, siendo F la tensión máxima correspondiente á la temperatura t, y allí ocupa el volumen U. Ahora bien, esta masa de aire tenía anteriormente en la atmósfera la presión H — f, y ocupaba en ella el volumen V que necesitamos. La ley de Mariotte da

$$V(H - f) = U(H - F), \quad \text{de donde} \quad V = U \cdot \frac{H - F}{H - f}.$$

Tal es el volumen V que debe ser llevado á la ecuación anterior.

646. **Higrómetro de cabello.** — 1°. *Principio.* — El *higrómetro de cabello*, inventado por Saussure, es el tipo de los *higrómetros de*

absorción, aparatos fundados en la propiedad que poseen ciertas sustancia orgánicas de alargarse por la acción de la humedad y de acortarse por la sequía.

2°. *Descripción del higrómetro de Saussure.* — Compónese de un cabello *c*, mantenido tenso en un marco de cobre (fig. 619) después que se le desengrasa previamente en una solución centesimal de sub-carbonato de sosa[1].

Fig. 619.

En su parte superior se encuentra mantenido por una pinza que se oprime mediante un tornillo *d*. Esta pinza se sube ó se baja, para poner tenso el cabello, valiéndose de un tornillo *b*, cuya tuerca, situada encima de *a*, es fija. Si el cabello estuviera atado, resultaría de ahí una torsión que haría irregular su alargamiento. Por su parte inferior se arrolla en una polea de dos gargantas *o*, á la cual está sujeto. En la segunda garganta se arrolla en sentido contrario un hilo de seda que sostiene un pequeño peso *p*. Por fin, el eje de la polea mantiene una aguja que se mueve sobre un cuadrante graduado.

Cuando se acorta el cabello, su contracción levanta la aguja; si se alarga, el peso *p* la obliga á bajar.

Graduación del cuadrante. — Punto de extrema sequedad (*cero*). — Colócase el higrómetro debajo de una campana de vidrio cuyo aire se seca por medio de sustancias muy ávidas de agua. Al cabo de *quince á veinte días* solamente, el cabello deja de acortarse y la aguja permanece estacionaria. Esto indica que el aire de la campana se encuentra completamente seco: entonces se marca cero en el cuadrante, allí donde la punta de la aguja se para.

Punto de mayor humedad (*grado* 100). — Retíranse de la campana las materias secantes y se mojan sus paredes con agua destilada. Ésta se evapora y no tarda en saturar el aire de la campana, por lo cual el cabello se alarga rápidamente. Entonces el contrapeso *p* hace girar la aguja en dirección opuesta al cero. En menos de *dos horas* se queda parada; el punto donde se detiene es el ciento. Después se divide el intervalo comprendido entre esos puntos en 100 partes iguales, que son los grados del higrómetro.

Observaciones. — 1ª. Según Saussure un cabello mantenido tenso por un peso de 3 decígramos se alarga entre 0° y 100°, en $\frac{1}{56}$ de su longitud. Los cabellos rubios son los que se alargan de manera más regular.

2ª. Es posible despreciar las prolongaciones del cabello debidas á las variaciones de temperatura, pues la dilatación correspondiente á una diferencia de 33° en la temperatura del aire no mueve la aguja sino los $\frac{3}{4}$ de un grado del higrómetro. Haciendo abstracción de esta escasa dilatación, se observa que, sea

1. También se puede desengrasarlo sumergiéndolo en éter sulfúrico durante veinticuatro horas, según hizo Regnault. Si no estuviera desengrasado, absorbería poco vapor y su alargamiento sería muy escaso.

cual fuere la temperatura, la aguja del higrómetro vuelve siempre exactamente al 0^0 en el aire perfectamente seco, y al grado 100 en el aire saturado : de manera que el cabello absorbe siempre la misma cantidad de agua, sean cuales fueren la temperatura y la densidad del vapor.

647. **Tabla de graduación de Gay-Lussac.** — La experiencia prueba que las indicaciones del higrómetro de cabello *no son en manera alguna* proporcionales al estado higrométrico del aire. Así, cuando la aguja marca 50, el aire se encuentra lejos de estar medio saturado y el estado higrométrico es inferior á 0,3. Ha sido, pues, preciso determinar *empíricamente* el estado higrométrico correspondiente á cada grado del cuadrante. Gay-Lussac lo ha logrado por medio de un artificio experimental, que se funda en el hecho siguiente : *Los vapores emitidos por una disolución salina ó ácida tienen una tensión máxima tanto más escasa dada una misma temperatura, cuanto más considerable es la cantidad de sal ó de ácido disuelta* [605].

Colocábase el higrómetro de cabello bajo una campana donde había una mezcla de agua y de ácido sulfúrico, y se tomaba nota del grado que marcaba el higrómetro en esta atmósfera saturada. Obteníase la tensión correspondiente del vapor bajo la campana haciendo penetrar en el vacío de un barómetro algunas gotas de la misma disolución ácida. Buscando, por fin, en las tablas de las fuerzas elásticas la tensión del vapor saturado á la temperatura del aire bajo la campana, se tenían los dos términos del cociente que representa el estado higrométrico del aire correspondiente al grado que indica el higrómetro. Gay-Lussac construyó también una tabla que expresa los estados higrométricos de 5 en 5, á la temperatura de las experiencias, que era de 10^0.

Experiencias de Regnault. — Según Gay-Lussac, esta tabla de graduación era aplicable á todos los higrómetros de cabello. Pero Regnault advirtió que las indicaciones de estos instrumentos varían con el origen de los cabellos, su color, su finura, el modo de desengrasarlos; de manera que para obtener indicaciones precisas, cada higrómetro debería tener una tabla particular. Esto prueba cuantas incertidumbres y dificultades presentan estos aparatos.

Observación. — Obsérvase, por ejemplo, que el higrómetro de cabello marca 72 cuando el aire está saturado á medias ($e = 0,5$) : este grado es el que el higrómetro marca con mayor frecuencia en la superficie del suelo ; de ahí se deduce que el aire contiene, por término medio, la mitad del vapor necesario para saturarlo. En los climas medios, el higrómetro no baja nunca hasta 100^0, aún después de las lluvias más abundantes. Durante las mayores sequías, es raro que suba por encima de 30 ($e = 0,148$). Al ascender en la atmósfera, la aguja marcha en general hacia el cero.

Fig. 620.

648. **Higróscopos.** — En la categoría de los higrómetros de absorción deben incluirse los *higróscopos*, aparatos que indican si en el aire hay más ó menos vapor ; pero que no dan á conocer su grado. Estos aparatos se fundan en la propiedad que tienen las cuerdas y tripas torcidas de destorcerse por efecto de la humedad, y de torcerse más por la sequía. Los hay de varias clases : los más usados son unos á que se da la forma de pequeños personajes, por ejemplo de franciscanos, cuya cabeza se cubre con un capuchón ó se descubre (fig. 620, I), según que el aire está

más ó menos húmedo. Los movimientos de la pieza móvil se deben á una pequeña tripa torcida, que se ata con aquella por una extremidad, mientras que por la otra termina en un punto fijo (fig. 620, II). Estos higróscopos son perezosos, quiere decir que funcionan con mucha lentitud y que sus indicaciones están siempre retrasadas respecto de las variaciones higrométricas del aire; además son muy poco sensibles.

649. **Higrómetros de condensación.** — Los higrómetros de condensación se construyen con arreglo á un principio enteramente distinto.

1°. *Principio.* — Si se enfría progresivamente un cuerpo tal como el vaso de vidrio A (fig. 621), colocado en una atmósfera no saturada, llega un momento en que el aire que se encuentra en contacto con la superficie del vaso, y que se enfría al mismo tiempo, alcanza la temperatura en que el vapor de agua que contiene se vuelve saturante. Entonces este vapor se condensa y se deposita en forma de *neblina* ó de *rocío* sobre la superficie enfriada. Un termómetro interior indica en ese momento la temperatura del *punto de rocío*, quiere decir, la de saturación de la capa de aire ambiente.

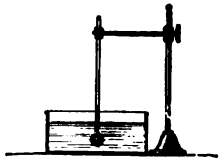


Fig. 621.

De esta simple observación se puede deducir el estado higrométrico del lugar. Efectivamente, en un espacio libre que contiene una mezcla de aire y de vapor no saturado á la presión atmosférica cuando la temperatura *baja*, la fuerza elástica del vapor *permanece constante*, pues aumenta por la disminución de volumen de la mezcla gaseosa tanto como disminuye por el descenso de temperatura. Ahora bien, esta tensión, que á la temperatura inicial era más ó menos inferior á la máxima, acaba necesariamente por convertirse en máxima cuando la temperatura baja indefinidamente; y por poco que disminuya aún el grado de calor, se pasa del punto de saturación y hay condensación. Este instante se conoce precisamente en la producción de rocío.

De manera que si se busca en las tablas de fuerzas elásticas la tensión f correspondiente á la temperatura del punto de rocío, esta tensión será precisamente la que poseía el vapor de agua en el momento de la experiencia. Tomando también en las mismas tablas, la tensión máxima F del vapor á la temperatura exterior del aire, el cociente $\frac{f}{F}$ representará el estado higrométrico de la atmósfera.

2°. *Ejemplo numérico.* — Siendo de 15° la temperatura del aire, supongamos que el *punto de rocío* sea 5°. En las tablas se encuentra, para las tensiones correspondientes á 5° y á 15°, f igual á 6,554 mm y F igual á 12,600 mm : lo que da 0,514 para el cociente $\frac{f}{F}$.

3°. *Tipos diversos de higrómetros de condensación.* — Los diversos higrómetros fundados en este principio no se distinguen entre sí más que por la facilidad mayor ó menor de producción del rocío, y por la precisión de la observación del punto de rocío. El higrómetro de Daniell, que fué el primero inventado, sólo tiene ya interés histórico. Regnault y Alluard lo perfeccionaron sucesivamente.

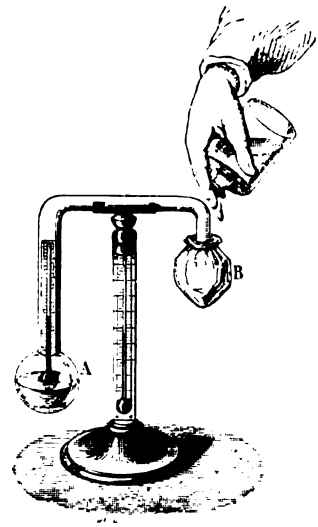


Fig. 622.

650. **Higrómetro de Daniell.** — *Descripción* — Compónese de dos bolas de vidrio azul (vidrio de cobalto), reunidas por un tubo encorvado dos veces (fig. 622). La bola A está en sus dos terceras partes llena de éter, donde penetra un pequeño termómetro contenido en el tubo. Las dos bolas y el tubo han sido purgados completamente de aire.

Operación. — Envuélvese de muselina la bola B y después se echa encima éter gota á gota. Este líquido al vaporizarse enfría la bola y este enfriamiento produce en la bola A la destilación del éter; la bola A

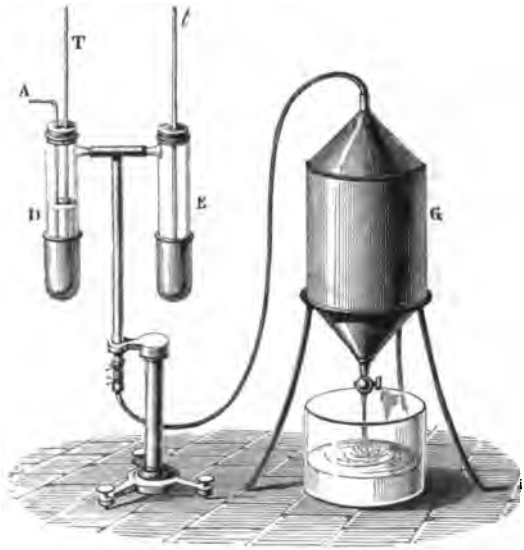


Fig. 623.

se enfría á su vez y lo mismo pasa con la capa de aire que está en contacto de

la bola; entonces se ve depositarse el rocío, en forma de anillo, á la altura de la superficie libre del líquido.

651. **Higrómetro de Regnault.** — *Descripción.* — Este instrumento se compone de dos cubiletes de plata, de paredes delgadas y pulimentadas (fig. 623), donde se ajustan dos tubos de vidrio D y E provistos cada uno de ellos de un termómetro muy sensible. El tapón del tubo D está atravesado por un tubo A abierto en sus dos extremidades y que penetra hasta el fondo del cubilete. Además, el tubo D se encuentra en comunicación por el pie mismo del soporte y por un tubo de plomo con un aspirador G lleno de agua. El tubo E no comunica con el aspirador, sino que contiene solamente un termómetro.

Operación. — Échase éter en el tubo D hasta la mitad próximamente y después se abre la llave del aspirador. El aire aspirado por el tubo A pasa á través del éter que vaporiza en parte, y que enfría de esta manera tanto más de prisa cuanto más rápida es la salida. Llega un instante en que el enfriamiento determina un depósito de rocío sobre el cubilete. Entonces se toma nota de la temperatura del termómetro T; en el momento en que la neblina desaparece, se marca de nuevo la temperatura del mismo termómetro y se toma la media para la temperatura del punto de rocío. Así se tienen los elementos necesarios para calcular el estado higrométrico.

652. **Higrómetro de Alluard.** — *Principio.* — Alluard ha perfeccionado mucho, simplificándolo al mismo tiempo, el higrómetro de Regnault. Su aparato se distingue en las dos circuntancias siguientes: 1°. la parte en que debe observarse el depósito de rocío es *una cara plana* A, perfectamente pulimentada, de plata ó de latón dorado (fig. 624); 2° esta cara plana está rodeada por una lámina de plata ó de latón B, dorada y pulimentada también, que no la toca, y que, como nunca se enfría, conserva siempre el mismo brillo. De ahí resulta que el depósito de rocío se observa con tanta claridad y precisión en la superficie A, que casi no hay diferencia entre la temperatura del depósito y la de desaparición del rocío.

Fig. 624.

Descripción. — El aparato tiene la forma de un prisma recto de base cuadrada. La tapadera superior está atravesada por tres pequeños tubos de cobre CG, DF, y E; CG penetra hasta el fondo, y los otros dos desembocan en la parte superior. El tubo E está provisto de un embudo para introducir el éter. La evaporación y el enfriamiento se producen, sea por medio de un aspirador, cuando se opera en un puesto fijo, sea

utilizando un pequeño fuelle continuo si se le emplea en un viaje. En el primer caso, el aspirador está unido al aparato por un tubo de caucho atado en I. En el segundo caso, el fuelle se adapta valiéndose de un conducto de la misma sustancia fijo en H. Dos pequeñas aberturas permiten juzgar de la agitación que produce en el éter sea la aspiración, sea la expulsión del aire.

Por fin, un conducto central da paso á un termómetro t que, por hallarse en el centro del líquido que se evapora, indica exactamente el *punto de rocío*. Otro termómetro t' marca la temperatura ambiente.

653. **Psicrómetro.** — El *psicrómetro* [1] da á conocer indirectamente el grado de humedad de la atmósfera, por la velocidad de la evaporación que sufre un cuerpo mojado expuesto en ella [2].

1°. *Descripción.* — El instrumento se compone de dos termómetros A y B (fig. 625), colocados paralelamente en una placa de cobre á una y otra parte de un tubo C que contiene agua destilada. El depósito B se envuelve en una muselina: una mecha de algodón, que arranca de la extremidad inferior del tubo C, lleva el agua hasta la muselina y la mantiene húmeda. Enfriado de esta manera por la evaporación que se produce en su superficie, el termómetro B marca constantemente una temperatura inferior á la del termómetro A; la diferencia es tanto mayor cuanto más rápida es la evaporación, y por consiguiente, cuanto más alejado está el aire de su punto de saturación.

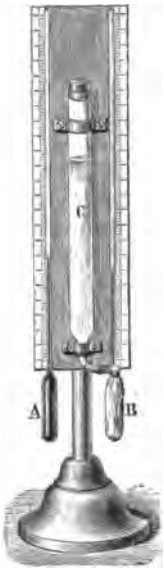


Fig. 625.

2°. *Fórmula del psicrómetro.* — De esta diferencia de las temperaturas $(t - t')$ se deduce la tensión x del vapor en el aire ambiente. Para ello se utiliza la ecuación

$$[1] \qquad A\,(t - t') = \frac{F' - x}{H},$$

de donde se deduce

$$x = F' - AH\,(t - t'),$$

en que t representa la temperatura del termómetro seco, t' la del húmedo, F' la tensión del vapor saturado á t' grados, H la presión atmosférica, y A un coeficiente que es constante para el mismo instrumento.

Esta ecuación expresa que *el calor recibido por el termómetro húmedo* (que según la ley de Newton citada más adelante es proporcional á la diferencia $t - t'$) *es igual al calor sustraído por la evaporación* (el cual es, según Dalton, directamente proporcional á la diferencia $F' - x$ é inversamente proporcional á H). Se alcanza esta especie de equilibrio cuando el termómetro húmedo ha adquirido una temperatura fija t'.

3°. *Operación.* — Se empieza por determinar A: para ello se efectúa un primer experimento en que se mide directamente x, por medio de un higrómetro; des-

1. De ψυχρος, frío, y μέτρον, medida.

2. La primera idea de este aparato se debe á Leslie; pero Augusto fué quien le dió la forma generalmente usada.

pués se pone el valor hallado de este modo en lugar de x en la ecuación [1], que da, para valores particulares de $(t - t')$, F' y H, el valor desconocido de A. Una vez despejada esta constante, la ecuación puede suministrar los valores de x correspondientes á los diferentes de t y de t', observados con ayuda del psicrómetro.

4°. *Crítica del aparato.* — Regnault observó que el coeficiente A no es absolutamente constante para un mismo instrumento: varía en particular con la velocidad del viento que le hiere, y con el lugar donde el aparato se encuentra colocado Además, á la temperatura de 0° y por debajo de ella, no es posible contar en manera alguna con su exactitud. Este es un gran inconveniente en las observaciones meteorológicas en las cuales se le emplea sin embargo casi exclusivamente. En la práctica sería ventajoso reemplazarlo por el higrómetro Alluard.

654. **Fórmulas relativas á la higrometría.** — *Calcular el peso* P *de un volumen de aire húmedo* V *cuyo estado higrométrico es* e, *la temperatura* t *y la presión* H.

Precisa observar que el volumen de aire dado no es más (según la segunda ley de las mezclas de los gases y de los vapores) que una mezcla de V litros de aire seco, á t grados y bajo una presión H disminuída en la tensión del vapor y de V litros de vapor, á t grados y á la tensión dada por el estado higrométrico : en consecuencia, hay que calcular separadamente el peso del aire y el del vapor.

La fórmula conocida $f = F \times e$ sirve para calcular la tensión f del vapor que existe en el aire, una vez dada e y estando F en las tablas. Una vez conocida la tensión f, si se llama f' la fuerza elástica propia del aire, se tiene

$$f + f' = H, \qquad \text{de donde} \qquad f' = H - f = H - Fe.$$

De modo que la cuestión se reduce á calcular el peso de V litros de aire seco á t grados y á la presión (H — Fe), y después el de V litros de vapor también á t grados; pero á la presión Fe. Este problema ha sido tratado anteriormente, y se le resuelve por las fórmulas

$$[1] \qquad p = V \,.\, 1,293 \,.\, \frac{1}{1 + \alpha t} \,.\, \frac{H - F\,e}{760};$$

$$[2] \qquad p' = V \,.\, 1,293 \,.\, \frac{5}{8} \,.\, \frac{1}{1 + \alpha t} \,.\, \frac{Fe}{760},$$

Sumando estas ecuaciones miembro á miembro, se tiene la fórmula definitiva

$$[3] \qquad P = V \,.\, 1,293 \,.\, \frac{1}{1 + \alpha t} \,.\, \frac{H - \frac{3}{8} Fe}{760}.$$

———

CAPÍTULO XII

CALORIMETRÍA.

—

CALORES ESPECÍFICOS DE LOS CUERPOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS. CALORES ESPECÍFICOS DE LOS GASES.

655. **Definiciones preliminares.** — *Calorimetría.* — Todos los efectos caloríficos estudiados precedentemente (variaciones de temperatura, dilataciones, cambios de estado), así como la mayor parte de las reacciones químicas, vienen acompañados de desprendimiento ó absorción de calor. La calorimetría tiene por objeto medir las cantidades de calor que aparecen ó desaparecen en estas variadas circunstancias.

Calorímetros. — Los métodos de medida se llaman *métodos calorimétricos*, y los aparatos que sirven para aplicarlos *calorímetros.*

Caloría. — Por fin, se miden directamente en *calorías* las cantidades de calor. La *caloría* es la cantidad de calor necesaria para elevar de 0° á 1° la temperatura, sea de 1 kilogramo (*caloría mayor*), sea de 1 gramo (*caloría menor*) de agua pura.

656. **Calores específicos.** — Obsérvase fácilmente que si se colocan pesos iguales de diferentes cuerpos en las mismas condiciones físicas y en un mismo lugar, se conducen de manera muy distinta desde el punto de vista calorimétrico: no emiten ni absorben la misma cantidad de calor para experimentar los mismos efectos caloríficos. Por ejemplo, si se mezcla 1 kilogramo de mercurio á 100° con 1 de agua á 0°, se observa que la temperatura del metal baja 97° y que la cantidad de calor por él perdida no calienta el mismo peso de agua sino 3°. De manera que el agua toma, *dada igualdad de peso*, unas 32 *veces más calor* que el *mercurio* para la misma elevación de temperatura.

Hay pues que distinguir en las diferentes sustancias una especie de capacidad propia en lo relativo al calor: es lo que se llama su *calor específico.* Se la define, ó mejor dicho, se la mide por la cantidad de calor *necesario* para elevar de 0° á 1° la temperatura de la unidad de peso (el gramo ó el kilogramo) de la sustancia.

657. **Principios fundamentales de la calorimetría.** — Todos los métodos calorimétricos se fundan en cierto número de principios ó lemas, análogos á postulados geométricos.

Lema I. — La cantidad de calor Q necesaria para elevar 1° la temperatura de un peso P de un cuerpo es proporcional á este peso.

Por ejemplo, se necesitarán 10, 20,... 100 calorías para elevar 1° la temperatura de 10 g, 20 g,... 100 g de agua. En general se tendrá $Q = Pc$ (c, calor específico).

Lema II. — Cuando se mezclan *pesos iguales* de dos cuerpos idénticos, la temperatura de la mezcla es igual á la *media* de las temperaturas.

Así, un gramo de agua á 0° y 1 gramo de agua á 100° dan 2 gramos de agua á 50° De ahí debe deducirse que :

La *cantidad de calor perdido* por cierto peso de una sustancia, para un determinado descenso de temperatura, es igual á la *cantidad de calor ganado* en una elevación de temperatura del mismo número de grados.

Lema III. — La cantidad de calor *ganado* ó *perdido* por un cuerpo para una variación de temperatura $(t' - t)$ es proporcional á la variación de temperatura.

Llamando Q á esta cantidad de calor, c al calor específico y P el peso de la sustancia, se tiene

$$[1] \qquad Q = Pc\,(t' - t).$$

Esta fórmula supone que c es *constante* en los límites de la temperatura donde se efectúa la variación. Esto es evidentemente exacto para el agua y la mayor parte de los sólidos entre 0° y 100° ; pero raras veces se confirma en los líquidos. Pronto indicaremos los límites en que la experiencia confirma este lema: veremos entonces que en los cuerpos precisa distinguir el *calor específico medio* y el *calor específico verdadero.*

658. **Capacidad calorífica** ó **Valor en agua de un cuerpo.** — En el caso del agua, la fórmula [1] se simplifica puesto que c es igual á 1; para un peso M de agua se tendría

$$Q' = M\,(t' - t).$$

Si se elige M igual al peso Pc, se tendrá evidentemente $Q' = Q$.

El producto Pc representa en consecuencia el *peso de agua* que necesitaría la misma variación de temperatura que el cuerpo considerado. De consiguiente este producto Pc puede definirse como el *valor en agua* de este cuerpo, ó también como este *cuerpo reducido á agua.*

Si la variación $(t' - t)$ se redujera á 1°, se tendría $Q = Pc$. El producto Pc representa, pues, igualmente la cantidad de calor que precisa comunicar al cuerpo para que su temperatura varíe 1°. De manera que esta cantidad puede considerarse como medida de la *capacidad calorífica* del cuerpo. El calor específico no es más que la *capacidad calorífica* de una sustancia para la *unidad de peso.*

659. **Diversos métodos calorimétricos.** — En la determinación de los calores específicos se usan tres métodos generales :

1°. El método de las *mezclas* (de Black);

2°. El método de la *fusión del hielo* (de Black);

3°. El método de *enfriamiento* (de Dulong y Petit).

También señalaremos;

1°. El procedimiento del *termocalorímetro* (de Regnault) :

2°. El método del *calorímetro de mercurio* (de Fabre y Silbermann);

3°. El método del *calorímetro de hielo* (de Bunsen);

4°. El método llamado *de temperatura constante* (del Dr. Arsonval).

Estos cuatro últimos métodos se han empleado más particularmente para medir las cantidades de calor que aparecen en los cambios de estado físico y en las reacciones químicas.

660. **Método de las mezclas. — Calorímetro de agua.** — El método de las mezclas se debe á Black; también se aplica perfectamente á los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos.

1°. *Principio del método.* — Supongamos que se trate de un cuerpo sólido. Después de pesarlo se le calienta á una temperatura conocida, manteniéndolo cierto tiempo en una corriente de vapor á 100°, luego se le introduce en una masa de agua fría cuyo peso y temperatura son igualmente conocidos. El calor específico del cuerpo se deduce de la temperatura que entonces cede al agua.

Representemos por M el peso del cuerpo, por T su temperatura en el momento de introducirle en el líquido y por c su calor específico; análogamente, sean m el peso del agua fría y t su temperatura inicial; en fin, sean m' el peso del vaso que contiene el agua, c' su calor específico (supuesto *conocido*); cuanto á su temperatura inicial, es evidentemente igual á t.

Desde que se introduce en el agua el cuerpo caliente, la temperatura del líquido sube, y acaba por alcanzar un máximum θ que permanece estacionario. Por consiguiente, el cuerpo se ha enfriado un número de grados igual á $(T - \theta)$ y en consecuencia ha perdido una cantidad de calor $Mc\,(T - \theta)$. Por el contrario, el agua y el vaso se calientan un número de grados igual á $(\theta - t)$ y han absorbido respectivamente cantidades de calor iguales á $m\,(\theta - t)$ y á $m'c'\,(\theta - t)$. Ahora bien, *la cantidad de calor cedida por el cuerpo caliente es igual á la suma de las cantidades de calor absorbidas por el agua y el vaso*, suponiendo que *ningún fenómeno accesorio capaz de absorber ó emitir calor altere el resultado;* luego, se tiene la ecuación

$$[1] \qquad Mc\,(T - \theta) = m\,(\theta - t) + m'\,c'\,(\theta - t).$$

Resolviendo esta ecuación respecto de la incógnita c, resulta

$$[2] \qquad c = \frac{(m + m'\,c')\,(\theta - t)}{M\,(T - \theta)},$$

ó bien, designando por la letra μ el producto $m'c'$ que representa el calorímetro *reducido al agua* ó la *capacidad calorífica* del calorímetro,

$$[3] \qquad c = \frac{(m + \mu)\,)\theta - t)}{M\,(T - \theta)}.$$

Observación. — Si c' no es conocido, debería empezarse por determinarlo, efectuando una experiencia previa con un peso M′ de la sustancia del calorímetro. La ecuación precedente pasaría entonces á ser

Fig. 626.

$$[1\ bis] \qquad M'\,c'\,(T - \theta') = m\,(\theta' - t) + m'c'\,(\theta' - t$$

y daría el valor de c'.

2°. *Aparato.* — El aparato más sencillo usado para eata experiencia es un *calorímetro de agua.* Compónese de un vaso de latón ó de plata, de paredes finas y pulimentadas, que se mantiene sobre un hilo de seda (fig. 626) á fin de evitar la pérdida del calor por conductibilidad. Este vaso se llena de agua donde se introduce un termómetro; un agitador de vidrio, *a*, sirve para mover el líquido mientras se le calienta, de modo que la temperatura se iguale en todos sus puntos.

661. Crítica del método de las mezclas. — Correcciones usuales. — La ecuación [1] expresa algébricamente el método de las mezclas. Se puede expresarla en lenguaje ordinario escribiendo que

el calor perdido por el cuerpo que se enfría
= el calor ganado por los cuerpos que se calientan.

Ahora bien, comparando esta expresión verbal con la ecuación, se ve que ésta no es completa, pues no tiene en cuenta todos los cuerpos que se calientan á expensas del cuerpo que se enfría.

1°. *Pérdidas de calor por los accesorios.* — Primeramente, hay varios accesorios que se calientan, y en particular el agitador y el termómetro. Este error se corregirá calculando previamente las capacidades caloríficas μ', μ'', etc., de todos estos accesorios é introduciéndolos, después de μ, en el primer factor del numerador de la ecuación [3].

Análogamente, si el cuerpo sometido á la experiencia estuviera contenido en una delgada envoltura de latón (precaución indispensable en el caso de los líquidos), esta envoltura *perdería* cierta cantidad de calor enfriándose $(T - \theta)$, grados. Para tener en cuenta esta circunstancia, bastará determinar previamente la capacidad calorífica μ_1 del vaso, y añadir este coeficiente á M. La fórmula [3] corregida de estos errores, pasará á ser

$$[3\ bis] \qquad c = \frac{(m + \mu + \mu' + \mu'')\,(\theta - t)}{(M + \mu_1)\,T - \theta)}.$$

2°. *Pérdidas de calor por conductibilidad y radiación.* — *Método de compensación.* — Además, el signo =, colocado entre los dos miembros de la ecuación [1], supone que no ha habido más calor perdido que el ganado por el calorímetro. Pero ha podido perderse alguno, y se ha perdido realmente, por otras dos vías : 1°. por *contacto directo* ó por *conductibilidad;* 2°. por *emisión á distancia* ó *radiación.*

La primera causa de error se evita colocando el calorímetro sobre soportes tan delgados y tan malos conductores del calor como es posible. Al efecto se utilizan, ya hilos de seda como en el calorímetro de Regnault (fig. 624), ya tres tapones de corcho cortados en punta como en el calorímetro de Berthelot (fig. 629) [1]

1. Más adelante veremos, al tratar de los gases, cómo efectuaba Regnault la corrección de conductibilidad.

Cuanto á la pérdida de calor por radiacción, se ha tratado de evitarla por un método que se llama de compensación y que se debe á Rumford.

Efectúase una experiencia previa para calcular aproximadamente el exceso final de la temperatura del calorímetro. Sea por ejemplo de 10°. Enfríanse previamente el agua y el vaso que deben servir, 5° por bajo de la temperatura del aire ambiente; después se procede á la experiencia definitiva. El vaso, cuya temperatura era primero 5° inferior á la del recinto, es al fin de la experiencia, 5° superior. Hay pues sucesivamente ganancia y después pérdida de calor por radiación durante el experimento y habría *compensación* si las dos fases sucesivas del fenómeno fueran de *duración idéntica*.

Pero es preciso observar que la temperatura del calorímetro varía al principio rápidamente, por causa de la gran diferencia que existe entre su grado de calor y el del cuerpo que en él se introduce y que esta velocidad de calefacción disminuye á medida que la temperatura del calorímetro se eleva. De ahí resulta que la primera fase de la experiencia es mucho más corta que la segunda : no habrá, pues, más que una *compensación insuficiente*. Así es que Regnault, que empleó el método de las mezclas con un calorímetro especial, corregía directamente esta pérdida por medio de un método de cálculo riguroso [1], fundado en la *ley del enfriamiento*.

662. **Calorímetro de Berthelot.** — Berthelot ha aplicado el método de las mezclas en sus trabajos de termo-química, por medio de un calorímetro perfeccionado.

El calorímetro propiamente dicho (fig. 627) se compone de un vaso que ordinariamente es de platino, de 63,43 g. de peso, y de paredes muy finas, en forma de

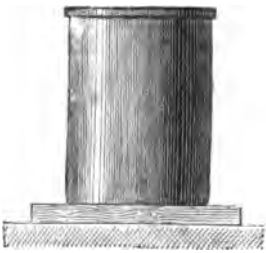


Fig. 627.

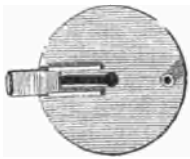


Fig. 628.

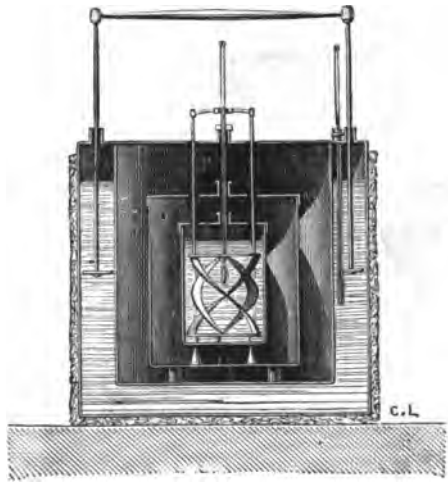


Fig. 629.

cubilete ; tiene una tapadera (fig. 628), también de platino, que se inserta *á bayoneta* sobre los bordes del vaso, y que está taladrado por diversas aberturas para el paso del termómetro, del agitador y de los tubos abductores de los gases ó de los líquidos.

Este vaso se coloca encima de un soporte mal conductor, en el centro de un primer recinto, constituído por un cilindro de cobre rojo muy delgado, plaqueado interiormente de plata pulimentada (fig. 629). El soporte aislador está formado por un triángulo de madera, armado de tres puntas de corcho, sobre las cuales se coloca directamente el calorímetro. El cilindro de cobre está cubierto por una

1. Pronto expondremos este cálculo (666).

Observación. — Si c' no es conocido, debería empezarse por determinarlo, efectuando una experiencia previa con un peso M' de la sustancia del calorímetro. La ecuación precedente pasaría entonces á ser

$$[1\ bis] \qquad M'c'(T - \theta') = m(\theta' - t) + m'c'(\theta' - t$$

y daría el valor de c'.

Fig. 626.

2°. *Aparato.* — El aparato más sencillo usado para eata experiencia es un *calorímetro de agua.* Compónese de un vaso de latón ó de plata, de paredes finas y pulimentadas, que se mantiene sobre un hilo de seda (fig. 626) á fin de evitar la pérdida del calor por conductibilidad. Este vaso se llena de agua donde se introduce un termómetro; un agitador de vidrio, *a*, sirve para mover el líquido mientras se le calienta, de modo que la temperatura se iguale en todos sus puntos.

661. Crítica del método de las mezclas. — Correcciones usuales. — La ecuación [1] expresa algébricamente el método de las mezclas. Se puede expresarla en lenguaje ordinario escribiendo que

el calor perdido por el cuerpo que se enfría
= el calor ganado por los cuerpos que se calientan.

Ahora bien, comparando esta expresión verbal con la ecuación, se ve que ésta no es completa, pues no tiene en cuenta todos los cuerpos que se calientan á expensas del cuerpo que se enfría.

1°. *Pérdidas de calor por los accesorios.* — Primeramente, hay varios accesorios que se calientan, y en particular el agitador y el termómetro. Este error se corregirá calculando previamente las capacidades caloríficas μ', μ'', etc., de todos estos accesorios é introduciéndolos, después de μ, en el primer factor del numerador de la ecuación [3].

Análogamente, si el cuerpo sometido á la experiencia estuviera contenido en una delgada envoltura de latón (precaución indispensable en el caso de los líquidos), esta envoltura *perdería* cierta cantidad de calor enfriándose $(T - \theta)$, grados. Para tener en cuenta esta circunstancia, bastará determinar previamente la capacidad calorífica μ_1 del vaso, y añadir este coeficiente á M. La fórmula [3] corregida de estos errores, pasará á ser

$$[3\ bis] \qquad c = \frac{(m + \mu + \mu' + \mu'')(\theta - t)}{(M + \mu_1)T - \theta)}.$$

2°. *Pérdidas de calor por conductibilidad y radiación.* — *Método de compensación.* — Además, el signo =, colocado entre los dos miembros de la ecuación [1], supone que no ha habido más calor perdido que el ganado por el calorímetro. Pero ha podido perderse alguno, y se ha perdido realmente, por otras dos vías : 1°. por *contacto directo* ó por *conductibilidad;* 2°. por *emisión á distancia* ó *radiación.*

La primera causa de error se evita colocando el calorímetro sobre soportes tan delgados y tan malos conductores del calor como es posible. Al efecto se utilizan, ya hilos de seda como en el calorímetro de Regnault (fig. 624), ya tres tapones de corcho cortados en punta como en el calorímetro de Berthelot (fig. 629) [1]

1. Más adelante veremos, al tratar de los gases, cómo efectuaba Regnault la corrección de conductibilidad.

Cuanto á la pérdida de calor por radiacción, se ha tratado de evitarla por un método que se llama de compensación y que se debe á Rumford.

Efectúase una experiencia previa para calcular aproximadamente el exceso final de la temperatura del calorímetro. Sea por ejemplo de 10°. Enfríanse previamente el agua y el vaso que deben servir, 5° por bajo de la temperatura del aire ambiente; después se procede á la experiencia definitiva. El vaso, cuya temperatura era primero 5° inferior á la del recinto, es al fin de la experiencia, 5° superior. Hay pues sucesivamente ganancia y después pérdida de calor por radiación durante el experimento y habría *compensación* si las dos fases sucesivas del fenómeno fueran de *duración idéntica*.

Pero es preciso observar que la temperatura del calorímetro varía al principio rápidamente, por causa de la gran diferencia que existe entre su grado de calor y el del cuerpo que en él se introduce y que esta velocidad de calefacción disminuye á medida que la temperatura del calorímetro se eleva. De ahí resulta que la primera fase de la experiencia es mucho más corta que la segunda : no habrá, pues, más que una *compensación insuficiente*. Así es que Regnault, que empleó el método de las mezclas con un calorímetro especial, corregía directamente esta pérdida por medio de un método de cálculo riguroso [1], fundado en la *ley del enfriamiento*.

662. **Calorímetro de Berthelot.** — Berthelot ha aplicado el método de las mezclas en sus trabajos de termo-química, por medio de un calorímetro perfeccionado.

El calorímetro propiamente dicho (fig. 627) se compone de un vaso que ordinariamente es de platino, de 63,43 g. de peso, y de paredes muy finas, en forma de

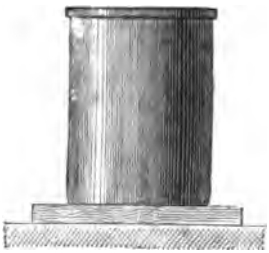


Fig. 627.

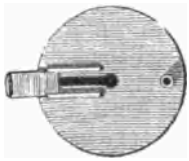


Fig. 628.

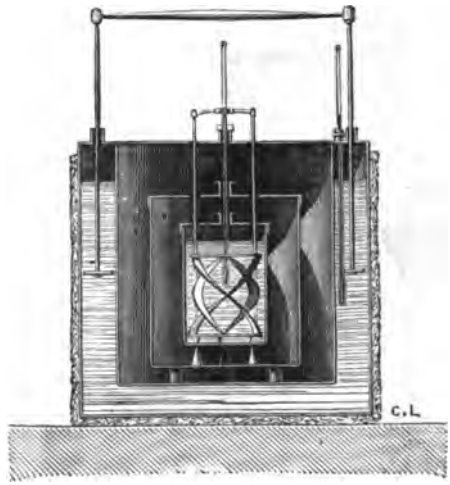


Fig. 629.

cubilete ; tiene una tapadera (fig. 628), también de platino, que se inserta *á bayoneta* sobre los bordes del vaso, y que está taladrado por diversas aberturas para el paso del termómetro, del agitador y de los tubos abductores de los gases ó de los líquidos.

Este vaso se coloca encima de un soporte mal conductor, en el centro de un primer recinto, constituido por un cilindro de cobre rojo muy delgado, plaqueado interiormente de plata pulimentada (fig. 629). El soporte aislador está formado por un triángulo de madera, armado de tres puntas de corcho, sobre las cuales se coloca directamente el calorímetro. El cilindro de cobre está cubierto por una

1. Pronto expondremos este cálculo (666).

tapadera del mismo metal, igualmente plaqueada de plata y provista de aberturas que corresponden á las del calorímetro.

Este primer recinto se apoya sobre tres delgados redondeles de cobre, en el centro de un segundo recinto de agua, constituido por un cilindro de paredes dobles de latón, entre las cuales se alojan de 10 á 40 litros de agua. El fondo del cilindro es también doble y está lleno de agua. Un agitador circular permite mover constantemente el líquido. Una tapadera de cartón, cubierta de estaño y taladrada por agujeros apropiados, cierra el orificio del cilindro. Toda esta envoltura exterior está cubierta de una camisa de grueso fieltro.

Observaciones. — 1°. La adición de este recinto de agua tiene por efecto suprimir completamente el error debido al enfriamiento y á la calefacción, *cada vez que la duración de la experiencia no pase de algunos minutos y que los excesos de temperatura del calorímetro no pasen de* 2°. En todo caso, tiene siempre la ventaja de disminuir el error y de regularizar la corrección.

2°. El agitador, que funciona en el calorímetro propiamente dicho, tiene una forma particular. Está formado por cuatro láminas helicoidales (fig. 629), muy delgadas, que se inclinan hasta 45° sobre la vertical, y normales á la superficie interna del cilindro calorímetro. Esas láminas se reunen en un marco formado por dos anillos horizontales, unidos por cuatro robustos vástagos, dos de las cuales, sujetas por una media-abrazadera de palo, se prolongan 15 centímetros por encima del vaso. El anillo inferior está provisto de cuatro pequeños pies, sobre los cuales descansa el agitador en el fondo del calorímetro.

663. Método de la fusión del hielo. — Black imaginó otro método calorimétrico más sencillo que el de las mezclas. Fúndase en la absorción de calor que acompaña la fusión del hielo, y en el conocimiento del calor de fusión de este cuerpo (de manera manifiesta igual á 79,25 calorías.

1°. *Procedimiento del pozo de hielo.* — Tómase un pedazo de hielo compacto donde se practica un agujero con un hierro hecho ascua (fig. 630). Ahí es donde se pone el cuerpo cuyo calor específico se busca, después de haberlo calentado á temperatura conocida. De antemano se allanan con el hierro hecho ascua los bordes del agujero y se les cubre con un pedazo de hielo, también allanado de modo conveniente, para que el cierre sea perfecto. Cuando se calcula que el cuerpo se ha enfriado hasta cero, se le retira, y después se extrae cuidadosamente el agua de fusión determinando con exactitud su peso M.

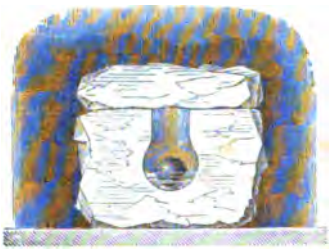


Fig. 630.

Ahora bien, sea m el peso del cuerpo cuyo calor específico C se busca, y T su temperatura inicial; el calor que ese cuerpo ha perdido enfriándose hasta 0° es evidentemente igual á m CT. Por otra parte, el calor ganado por el peso M de hielo que se ha transformado en agua á 0°, es igual á 79,25 × M. Tiénese, pues, la ecuación

$$[1] \qquad mCT = M.\,79{,}25, \qquad \text{de donde} \qquad C = \frac{79{,}25\,.\,M}{mT}.$$

2°. *Procedimiento del calorímetro de hielo* (de Laplace y Lavoisier). — Laplace y Lavoisier creyeron perfeccionar el procedimiento de Black sirviéndose de un calorímetro especial, llamado *calorímetro de hielo.*

Está formado por tres envolturas concéntricas de latón (fig. 631). En el centro se pone el cuerpo M, estando llenos de hielo machacado los otros dos vasos. El del vaso A se destina á ser fundido por el cuerpo caliente, y el del vaso B detiene en su paso al calor que irradia desde el recinto sobre el aparato.

Varias son las causas de error que hay en este procedimiento, por lo cual no se le usa ya.

664. **Método del calorímetro de hielo** (de Bunsen). — El *calorímetro de hielo*, imaginado por Bunsen en 1870, se funda, no

Fig. 631.

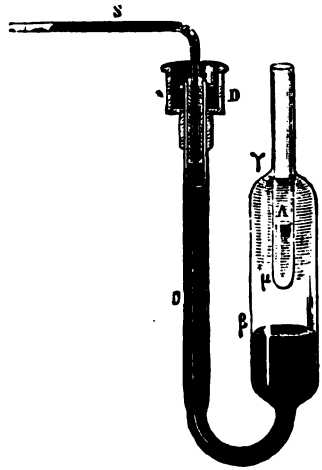


Fig. 632.

en la absorción de calor, sino en la *contracción de volumen* que acompaña la fusión del hielo. Es un instrumento sumamente exacto.

1°. *Descripción.* — Compónese de un grueso tubo de vidrio, encorvado á manera de sifón (fig. 632), cuya rama menor termina en forma de ancha cubeta cilíndrica βγ. Ésta se cierra por medio de un tubo ó *mufla* de vidrio A, que penetra en ella y está soldado en todo su contorno: en esta mufla es donde se colocan los cuerpos sometidos á medidas calorimétricas. El depósito se encuentra lleno de agua hasta β; lo restante del depósito, así como la rama mayor C del sifón y el tubo horizontal graduado S, que forma su continuación, están llenos de mercurio. La reunión del tubo graduado y del sifón se efectúa por mediación de una pequeña cubeta δD llena de mercurio.

Haciendo evaporar alcohol dentro del tubo A, se determina la formación de una capa de hielo más ó menos gruesa en torno de este tubo, dentro del depósito βγ cuya agua al congelarse aumenta de volumen y rechaza el mercurio á β. Esta presión se trasmite, como una dilatación, al mercurio de la rama horizontal, que entonces se adelanta cierta longitud. Cuando la extremidad de esta columna mercurial se mantiene fija, el aparato está preparado para la experiencia.

2°. *Graduación.* — La primera operación consiste en la graduación del tubo dividido en *calorías.* Echase en el vaso A una masa de agua P' á la temperatura T'. Este agua se enfría hasta 0° en contacto de la capa de hielo, y le cede P'T' calorías. El calor se gasta en fundir parte del hielo, que es reemplazado por una cantidad de agua de masa idéntica, pero de *menor volumen.* De este hecho resulta por consiguiente una contracción, que hace subir de nuevo ligeramente el nivel del mercurio hasta β, y que reduce el nivel mercurial en S cierto número de grados *n'*. De ahí se deduce que

n' grados del tubo dividido corresponden á P'T' calorías

y que, en consecuencia,

$$1 \text{ grado del tubo dividido corresponde á } \frac{P' T'}{n'} = \alpha ;$$

α es la *constante del instrumento.*

3°. *Operación.* — Una vez que la columna mercurial vuelve á quedar fija, se proyecta rápidamente en la mufla A el cuerpo sometido á la experiencia, y se observa la marcha del mercurio en S. Sea n el número de grados que la columna varía : la variación de las calorías es evidentemente igual á n. Si la columna ha avanzado, como en la experiencia de graduación, es que hay *desprendimiento de calor* en la mufla ; si la columna ha retrocedido, es que ha habido *absorción de calor.*

4°. *Ejemplo.* — Supongamos que se trate de determinar el calor específico de una sustancia sólida ó líquida. Sea M el peso de la sustancia ensayada, T la temperatura inicial á que se la ha elevado, y c su calor específico desconocido. La sustancia ha cedido evidentemente un número de calorías igual á McT al enfriarse hasta 0°. Tiénese, pues, la ecuación

$$McT = n\alpha. \quad \text{de donde} \quad c = \frac{n\alpha}{MT}.$$

Observación. — Este método tiene la ventaja de evitar las correcciones de temperatura, puesto que todas las operaciones se efectúan á 0° ; pero siempre hay alguna incertidumbre sobre la temperatura inicial T del cuerpo sometido á la experiencia.

665. **Métodos calorimétricos de temperatura constante.** — El calorímetro de agua, ó de cualquier otro líquido, tiene el inconveniente de hacer variar durante la experiencia la temperatura del líquido calorimétrico y por consiguiente la del cuerpo estudiado. Supongamos, por ejemplo, que se trate de medir una cantidad que sea función de la temperatura : hay que hacer de modo que la temperatura no varíe ó de que varíe muy poco. Así se llega necesariamente á usar métodos calorimétricos *de temperatura constante* mientras dura una experiencia, y tales que sea posible hacer variar la temperatura de una experiencia á otra : de consiguiente, es posible estudiar la ley con arreglo á que se modifica el fenómeno observado con la temperatura.

I. *Experiencias del Dr d'Arsonval.* — El Dr d'Arsonval es quien primero aplicó este método, con objeto de estudiar el calor emitido á cada instante por los seres vivos.

1°. Su aparato es una aplicación de su recinto *de temperatura constante.* En este primer recinto, coloca otro á la misma temperatura, y en éste, que es el calorímetro propiamente dicho, introduce un animal. El calorímetro no puede experimentar ningún enfriamiento ; al contrario es objeto de una elevación de temperatura producida por el animal. Este calor es constantemente sustraído por una corriente de agua á cero que atraviesa un serpentín alojado en las paredes del calorímetro y sale al exterior después de haber adquirido la temperatura de este último. Un mecanismo muy sencillo regula la velocidad de la corriente de agua, de manera que el calorímetro conserva siempre su temperatura inicial. Inscribiendo en un cilindro animado de movimiento continuo las fases de esta salida, se tiene la cantidad de calor producida y las fases de esta producción [1].

2°. Este método se modifica un tanto para medir las absorciones de calor.

3°. En otro método ha utilizado el Dr Arsonval, para absorber el calor emitido por los animales, el calor de vaporización de los líquidos muy volátiles, tales

1. El método del D. Arsonval ha sido utilizado poco hace por M. C. Miculescu para calcular el equivalente mecánico del calor (Tesis de doctorado, Sorbona. 1891).

como el cloruro de etilo, que hierve á + 120,5 y que es fácil obtener en el comercio.

II. *Experiencias de M. E. Mathias.* — M. Mathias ha empleado en trabajos recientes sobre el calor de vaporización de los gases reducidos á líquidos (681) un método calorimétrico *de temperatura constante*, que es exactamente inverso del segundo propuesto por el Dr d'Arsonval.

El método de Mathias consiste en compensar á cada instante el enfriamiento del calorímetro *de agua*, debido á la vaporización del gas liquefacto, por medio de un manantial de calor conocido; este es el calor desarrollado por la dilución en el agua del calorímetro de un peso conocido π de ácido sulfúrico concentrado. Esta cantidad de calor viene dada por la fórmula

$$Q = \frac{a\pi}{b+\pi},$$

cuyas constantes a y b han sido determinadas por gran número de medidas directas del calor de dilución del ácido sulfúrico empleado. Una vez determinada esta fórmula, basta una pesada para conocer con mucha exactitud la cantidad de calor introducido en el calorímetro: puede decirse que *se pesa* el calor.

666. **Método del enfriamiento.** — 1°. *Principio.* — El método del enfriamiento se funda en la ley descubierta por Newton (697).

Consideremos un sistema de cuerpos que tengan como capacidad calorífica $m + pc$; por ejemplo un cuerpo de peso p y de calor específico c contenido en un vaso de capacidad m; si en un minuto experimenta un descenso de temperatura $\Delta\theta$, la cantidad de calor Δq, perdida por el enfriamiento, estará dada por la ecuación general

$$\Delta q = (m + pc)\,\Delta\theta.$$

Por otra parte, según la ley del enfriamiento, esta cantidad de calor, perdida por radiación, es proporcional á la superficie radiante s, á su poder emisivo μ, al exceso de temperatura del vaso sobre el medio ambiente θ y á la duración t del enfriamiento: así se tiene pues

$$\Delta Q = K\mu s\theta.t, \qquad \text{de donde} \qquad (m + pc)\,\Delta\theta = K\mu s\theta.t$$

y por consiguiente

$$[1] \qquad = \frac{(m + pc)}{K\mu s}\,\frac{\Delta\theta}{\theta}.$$

Supongamos ahora que se repite la experiencia con un cuerpo de capacidad $p'c'$, que se hace enfriar en las mismas condiciones, y sea t' el tiempo necesario para obtener *el mismo descenso de temperatura* $\Delta\theta$, á partir de la misma temperatura inicial θ. Se tendrá análogamente

$$[2] \qquad t' = \frac{m + p'c'}{K\mu s}\,\frac{\Delta\theta}{\theta}.$$

Dividiendo miembro á miembro las dos ecuaciones [1] y [2], se tendrá la igualdad

$$\frac{t}{t'} = \frac{m + pc}{m + p'c'},$$

de donde se puede deducir c, si m y c' son conocidos.

2°. *Experiencias de Dulong y Petit.* — Estos físicos fueron los primeros en aplicar el indicado método á la medida del calor específico de los cuerpos sólidos y líquidos.

Al efecto empleaban un pequeño vaso de plata V, formado por dos cilindros concéntricos (fig. 633): en la parte anular ponían el cuerpo de calor específico desconocido c; la central servía para el termómetro calorimétrico. Cuando el cuerpo era sólido, para aumentar el contacto entre él y el vaso y el termómetro, se le reducía á polvos finos, que se comprimían fuertemente. El vaso V estaba suspendido por medio de dos hilos de seda dentro de un recinto metálico E, cuya abertura, bastante grande para introducir el vaso V, estaba cerrada por un tapón

que sostenía el termómetro calorimétrico. El recinto E estaba sumergido en un baño de hielo fundente MN, donde era posible hacer el vacío mediante un tubo tt'; el recinto estaba barnizado de negro de humo interiormente.

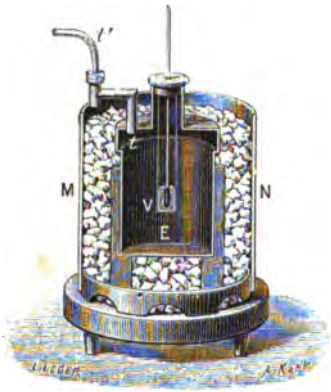


Fig. 633.

Para operar se calentaba el vaso V á 30° ó 40°; colocábase en el recinto rodeado de hielo fundente, hacíase rápidamente allí el vacío y se observaba, en el contador de segundos, cuanto tiempo t tardaba el termómetro en bajar de 10° á 5°. Repetíase la misma operación con un cuerpo de calor específico conocido c', y se obtenía otro tiempo de enfriamiento t'. Sea m el valor en agua del vaso de plata y del termómetro, p y p' los pesos de los cuerpos examinados, c y c' sus calores específicos medios entre 5° y 10°; teníase

$$\frac{}{t'} = \frac{m + pc}{m + p'c'}.$$

Observación. — Es preferible determinar m experimentalmente de una vez para siempre, comparando, por el método anterior, el agua y otro cuerpo cuyo calor específico haya sido determinado de antemano por el método de las mezclas.

3°. *Experiencias de Regnault. — Termocalorímetro.* — Por la comparación experimental del método de las mezclas y del de enfriamiento probó Regnault que este último no da buenos resultados con los cuerpos sólidos, porque el calor específico de éstos depende del grado de compresión de los polvos examinados. Por el contrario, el método produce buenos resultados con los líquidos. Tal es también el parecer de *Bussy*, que efectuó con ciertos líquidos orgánicos buenas medidas de calor específico por el método de enfriamiento.

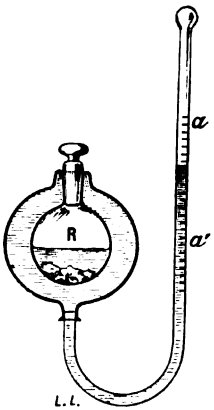


Fig. 634.

Regnault introdujo ciertos perfeccionamientos importantes en la manera de experimentar de Dulong y de Petit; pero lo que le pertenece hablando en propiedad es el invento del *termocalorímetro*, que le permitió efectuar medidas de calor específico con ayuda de muy pequeñas cantidades de materia.

Consiste en un termómetro de alcohol R (fig. 634) de depósito hueco, cerrado con un tapón al esmeril; el vástago encorvado dos veces, lleva en su parte vertical una graduación. El aparato se calienta de modo que el líquido suba hasta la parte superior del vástago; entonces se pone e depósito R en el hielo fundente y se observan los tiempos t, t', t'' que tarda el líquido en bajar de la división a á la división a': 1°. cuando el depósito interior está vacío; 2°. cuando se coloca en él un peso P de agua; 3°. cuando se introduce allí un peso p de un líquido de calor específico desconocido c.

Sea μ la constante del calorímetro; tiénese

$$\frac{t}{\mu} = \frac{t'}{P + \mu} = \frac{t''}{pc + \mu}; \quad \text{de donde} \quad c = \frac{P}{p}\,\frac{t'' - t}{t' - t}.$$

Es evidente que también se puede emplear este aparato para calcular el calor específico de los cuerpos sólidos.

667. **Calores específicos de los sólidos y de los líquidos : Resultados generales.** — 1°. *Variación con la sustancia.* — El examen de las tablas de los calores específicos prueba que el calor específico es un coeficiente variable de una sustancia á otra; pero que todos los calores específicos son inferiores á los del agua, puesto que están representados por números inferiores á la unidad. (El más pequeño es el del mercurio, que apenas pasa de 0,03.) Esto justifica la preferencia que se ha dado al agua para definir la caloría.

2°. *Variación con el estado molecular.* — El calor específico varía, dada la misma sustancia, con su estado molecular. El carbón suministra un ejemplo muy claro de esta variación. Así, el calor específico del *diamante* es 0,15 ; el del *grafito*, 0,20.

3°. *Variación con el estado físico.* — Dada una misma sustancia, el calor específico varía con su estado físico: en general *es mayor en estado líquido*, que en *el sólido*. Por ejemplo, el calor específico del hielo es *mitad* que el del agua. El de un gas es también más pequeño que el del líquido generador.

4°. *Variación con la temperatura.* — El calor específico es variable, dada una misma sustancia, según los límites de temperatura entre que se la ha medido.

En los cuerpos sólidos, la variación es despreciable entre 0° y 100; es grande y va creciendo para las temperaturas superiores á 100°. Es tanto mayor cuanto más se acerca el cuerpo sólido á su punto de fusión.

En los líquidos, la variación con la temperatura es más acentuada aún. La mayor parte de ellos tienen un calor específico que ni siquiera entre 0° y 100° es constante.

En el agua son mucho más pequeñas las variaciones; pero no *nulas*, según supusimos anteriormente.

668. **Fórmulas empíricas. — Calor específico medio y calor específico exacto.** — 1°. *Definición.* — De los hechos expuestos resulta que la cantidad de calor que precisa comunicar á la unidad de peso de un cuerpo para elevar su temperatura de 0^0 á t^0, no es *proporcional* á t. Si se representa por Q esta cantidad, no es posible expresarla por una ecuación del primer grado , pero como crece cuando sube la temperatura, se podrá expresarla por una fórmula de dos ó tres términos : luego, en vez de la ecuación simple

$$Q = \alpha t, \quad \text{se tendrá} \quad Q = \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3; \qquad [1]$$

α, β y γ son coeficientes constantes, que se determinarán por medio de tres experiencias directas, las cuales darán tres ecuaciones del primer grado en α, β y γ.

Esta fórmula empírica una vez planteada, será posible deducir de ella ya el *calor específico medio* (*entre* 0^0 y T^0), ya el *calor específico exacto á* T^0.

El calor específico medio entre 0^0 y T^0, es *la razón del calor total* que ha sido necesario comunicar para calentar la unidad de peso del cuerpo de 0^0 á T^0, *y de esta temperatura*, ó sea $\frac{Q}{T}$. Se le obtendrá efectuando una determinación experimental de Q á T^0, y llevando estos números á la ecuación [1]. Dividiendo estos dos miembros por T, se tiene

$$[2] \qquad \frac{Q}{T} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 = C_{\cdot}^{T}.$$

Si se toma la razón $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ del aumento de calor y de la elevación de temperatura y se pasa *al límite*, haciendo tender ΔT hacia cero, se tendrá lo que se llama el *calor específico exacto* de la sustancia á la temperatura T. Resulta

$$[3] \qquad \lim \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ ó } C_T = \alpha + 2\beta T + 3\gamma T^2.$$

Obsérvase que la función [3], que representa el *calor específico exacto* se distingue del *calor específico medio* por los valores numéricos de sus coeficientes.

2°. *Experiencias de M. Violle. — Aplicación á la termometría calorimétrica.* — M. Violle ha determinado estos dos calores específicos para el platino, á diversas temperaturas, utilizando el método de las mezclas. Un termómetro de gas y un vaso de porcelana sin esmaltar que contienen una masa conocida de platino se introducen en la misma mufla de un hornillo de doble envoltura, calentado con gas (sistema Perrot). Cuando la temperatura queda estacionaria á T^0, la masa de platino es introducida en un cilindro que se baña en el agua de un calorímetro. Una medida calorimétrica da á conocer el *calor específico medio* del platino para el intervalo $0^0 - T^0$.

Haciendo variar T, reconoció M. Violle que el calor específico medio del platino podía calcularse por la fórmula siguiente:

$$[1] \qquad C_0^T = 0{,}0317\ T + 0{,}000\,006\ T^2.$$

Análogamente obtuvo el calor específico exacto á T^0 para

el oro. . . . . $C_T = 0{,}0324 + 0{,}0000\,03\ T$,
el paladio . . . . $C_T = 0{,}0582 + 0{,}0000\,20\ T$.
el iridio. . . . . $C_T = 0.0317 + 0{,}0000\,12\ T$.

Inversamente, la fórmula [1] permite, mediante la determinación directa de C_0^T, calcular el intervalo de temperatura $0^0 - T^0$.

La fórmula es legítima en un intervalo comprendido entre 0^0 y 1200^0. Así es como M. Violle fijó la escala de las temperaturas elevadas que sirve en las medidas pirométricas.

669. **Leyes relativas á los calores específicos de los átomos.** — 1°. *Ley de Dulong* y *Petit.* — Comparando los calores específicos de los cuerpos simples (metales, azufre y teluro) con sus *pesos atómicos*, Dulong y Petit descubrieron una ley notable:

El producto c P *del calor específico de un cuerpo simple por su* peso atómico es un número constante.

En efecto, mientras que los calores específicos c varían de 1 á 7 y los pesos atómicos P de 1 á 18, los productos c P no varían sino de 6 á 6, 8. Por consiguiente es posible considerar estos productos como realmente constantes, y admitir que en general se tiene $c\,P =$ constante.

2°. *Otro enunciado: Constancia del calor atómico.* — Sea P el peso atómico de una sustancia y n el número de átomos contenidos en la unidad de peso de la sustancia; sea γ el *calor específico del átomo* ó *calor atómico.* Puesto que c es el calor específico de la unidad de peso, se tiene evidentemente entre c é γ la ecuación $c = n\gamma$. Por lo demás, se tiene $1 = n\,P$. Dividiendo estas dos igualdades miembro á miembro resulta

$$c = \frac{\gamma}{P}, \quad \text{de donde} \quad cP = \gamma = \text{constante}.$$

De manera que esta ley se puede enunciar diciendo que :

El *calor atómico es un* número constante *para todos los cuerpos simples*, ó bien que *todos los átomos* (*de los cuerpos simples*) *tienen* la misma *capacidad calorífica.*

3°. *Ley de Neumann.* — Neumann descubrió que *en todos los sulfatos metálicos de la fórmula* RO SO^3, *el producto* cE *es un número constante* (*siendo* E *el peso equivalente de la sal*).

Este producto toma otro valor cuando se cambia el ácido, por ejemplo cuando se pasa de los sulfatos á los carbonatos, y en general de una clase á otra de compuestos, que tengan un elemento constante y una composición análoga.

4°. *Ley de Westyn.* — *La capacidad calorífica de un cuerpo compuesto es igual á la suma de las capacidades caloríficas de cada uno de sus elementos, considerados con sus pesos respectivos.*

Si se considera por ejemplo un compuesto de la forma $A^a B^b D^d$, cuyo calor específico es C, y si c, c', c'', son los calores específicos de los elementos A, B, D, la ley de Westyn permite escribir

$$(A^a B^b D^d) C + aAc + bBc' + dDc''.$$

Esta ecuación ha sido demostrada experimentalmente por Regnault en gran número de casos. También es exacta para las aleaciones.

670. **Calor específico de las disoluciones salinas dilatadas.** — *Fórmula de M. Mathias.* — Consideremos una disolución que contenga *n* moléculas del disolvente por una del cuerpo disuelto; M. Mathias ha probado que á partir de cierto límite inferior de *n* (generalmente igual á 20 ó 25 para las disoluciones acuosas, á veces menor) el calor específico $_{\gamma}n$ de la disolución, está representado por la fórmula

$$_{\gamma}n = \frac{a+n}{b+n} c,$$

en que *c* es el calor específico del disolvente, *a* y *b* constantes.

Esta fórmula se aplica á todas las disoluciones, acuosas ó no, cuyo calor específico no represente máximo.

Las experiencias de Marignac y Thomsen son admirablemente expresadas por esta fórmula : la demostración se ha efectuado con unos *ochenta* cuerpos ; el error alcanza raras veces 3 unidades del tercer orden decimal ; el *cloruro de zinc*, en disolución acuosa dilatada, es el único que se exceptúa.

CALORES ESPECÍFICOS DE LOS GASES.

671. **Definiciones.** — El calor específico de los gases se define, como el de los líquidos y sólidos, refiriéndolo al del agua ; pero existen para cada gas, — por razón de su estado físico, — dos coeficientes que precisa considerar, esto es : 1°. el calor específico *bajo presión constante*, que es análogo al de los sólidos y de los líquidos; 2°. el calor específico *bajo volumen constante.*

El calor específico de un gas *bajo presión constante* es la cantidad de calor que precisa comunicar á 1 gramo del gas para elevar su temperatura de 0^0 á 1^0, dejándole dilatarse libremente bajo presión constante. Con el aire, pongamos por ejemplo, este coeficiente C es igual á 0,237 cal.

El calor específico *bajo volumen constante* es la cantidad de calor necesario para elevar de 0^0 á 1^0 la temperatura de 1 gramo de gas, *pero sin dejarlo dilatarse*, y por consiguiente manteniendo su volumen *constante*. Por ejemplo, para el aire este coeficiente *c* es igual á 0,169 cal.

Compréndese que *c* sea menor que C, por causa del desprendimiento de calor que resulta de la compresión misma del gas á que se impide dilatarse.

Sólo es posible determinar directamente por la experiencia el calor específico C bajo presión constante. El otro coeficiente *c* se conoce indirectamente por medio

de la razón $\frac{C}{c}$ que se ha podido medir directamente, según veremos en el capítulo consagrado á la Termodinámica.

672. **Determinación del calor específico de los gases (bajo presión constante).** — *Experiencias de Regnault.* — El calor específico de los gases bajo presión constante ha sido determinado sucesivamente con ayuda de dos métodos :

El método *del enfriamiento*, utilizado por Delaroche y Berard ;

El método *de las mezclas*, usado por Regnault.

No expondremos aquí sino el último.

1°. *Principio del método de Regnault.* — Consiste en la aplicación directa del método de las mezclas á los gases, con ciertas modificaciones exigidas por el estado físico de estos cuerpos.

Llévase una masa M del gas á una temperatura inicial T, y después se la deja enfriar en un calorímetro de agua cuya temperatura inicial es θ. Sea θ' la temperatura final del calorímetro: como la experiencia es necesariamente de larga duración, por causa de la necesidad de hacer pasar por el calorímetro una masa notable del gas, el descenso de temperatura de éste debe ser calculado, no ya con relación á la temperatura final θ', sino respecto de una temperatura media θ y θ'; adóptase la temperatura media $\frac{\theta + \theta'}{2}$. Cuanto á la elevación de temperatura del calorímetro, siempre está representada por $(\theta' - \theta)$. En consecuencia, si se llama M' la masa de agua del calorímetro, aumentada con los accesorios *reducidos al agua*, la ecuación de la experiencia será

$$[1] \qquad M\left[T - \frac{\theta + \theta'}{2}\right] = M'(\theta - \theta),$$

salvo las correcciones referentes á la conductibilidad y á la radiación.

2°. *Descripción del aparato.* — Se conserva el gas seco y puro en un gran depósito (ó gasómetro) G (fig. 635, I), cuya temperatura se mantiene constante gracias á un baño de agua donde está sumergido. La temperatura del baño está dada á cada instante por el termómetro *t*.

Del gasómetro salen varios conductos de llave: uno *ra*, que comunica con la bomba de compresión, sirve para llenar el depósito ; otro *r' a'*, comunica con un tubo abductor *a'* ; otro *r' a" r"*, comunica con una llave *distribuidora* (ó *reguladora*) R y con un manómetro de aire libre M.

Esta llave R, que representamos en mayor escala (fig. 635, II) está destinada á regular la velocidad de salida del gas. Consiste en un tornillo, que puede llenar más ó menos, al penetrar en él progresivamente, el tubo de conducción del gas. La cabeza de tornillo está provista de un tambor graduado, que se mueve delante de una regleta (como la del esferómetro), permitiendo los movimientos progresivos y regulares. Es posible convencerse de si la corriente tiene velocidad constante por las indicaciones del manómetro M : la presión marcada debe ser *constante* para una *velocidad de salida determinada*.

Después del manómetro viene un serpentín de latón delgado, metido en una estufa E, de agua ó de aceite. Ahí es donde el gas va á calentarse hasta la temperatura T, antes de penetrar en el calorímetro propiamente dicho. Un termómetro *t'*, puesto en el espacio que deja el serpentín, en la salida del gas, sirve para conocer la temperatura, que debe ser la del baño.

Por fin, el calorímetro propiamente dicho C se compone de un vaso metálico lleno de agua, donde el gas va á enfriarse pasando por un segundo serpentín. Éste se encuentra formado por una serie de cajas planas de latón, que penetran unas en otras, y cada una de las cuales está provista de una pared metálica en espiral (fig. 635, III), destinada á multiplicar los puntos de contacto del gas con la pared. Al salir del calorímetro, el gas, enfriado á la temperatura θ', se pierde en la atmósfera. Un termómetro *t"* da la temperatura del calorímetro, y un termómetro exterior la de la atmósfera.

Observación. — Como las dos partes próximas E y C del aparato se encuentran á temperaturas diferentes, podía temerse una comunicación notable de calor por conductibilidad. Á fin de atenuar en cuanto es posible esta causa de error, Regnault reunía estas dos piezas por medio de un grueso tubo de vidrio *v* ; ade-

más, el tubo abductor, que conduce el gas al serpentín del calorímetro, pasaba por un tapón de corcho, que estaba mantenido á su vez en el conducto *v*.

3°. *Marcha de las experiencias.* — Trátase de determinar los coeficientes que

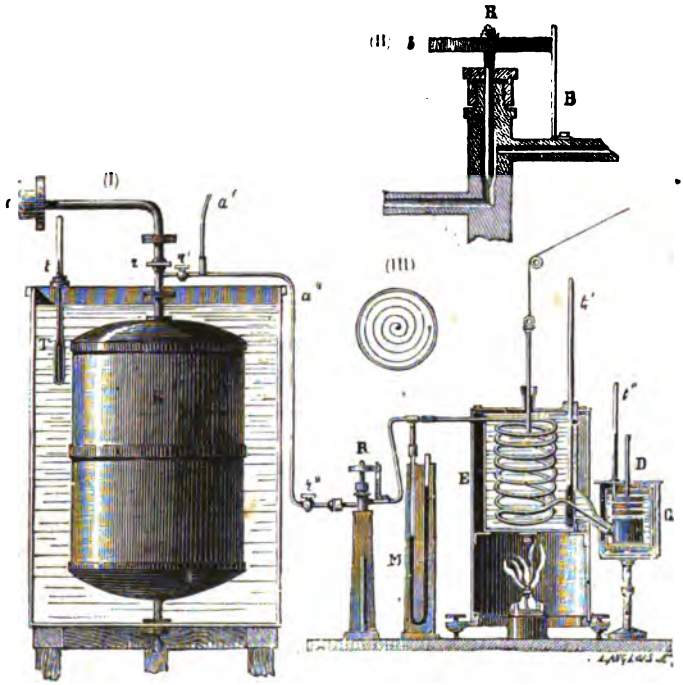


Fig. 635.

entran en la ecuación [1] á saber: M, M', T, θ, θ', así como los datos necesarios para efectuar las correcciones de conductibilidad y de radiación.

La determinación de M' se efectuaba mediante una pesada previa, la de T, θ y θ' por lecturas termométricas.

Regnault determinaba M aplicando una consecuencia de la ley de Mariotte, á saber la proporcionalidad del peso de cierto volumen de gas á su presión. Para ello tomaba nota de la presión H indicada por el manómetro M, antes de que empezara la salida del gas, y después la presión *h* al fin de la experiencia. De ahí deducía, que la presión del gas contenido en el depósito *b* había disminuído en (H — *h*). De manera que podía plantear la ecuación

$$M = a\,(H - h),$$

siendo *a* una constante que determinaba experimentalmente, antes ó después de la operación. Con tal fin bastaba dar salida á un peso conocido M_0 del mismo gas, de modo que el descenso de presión fuera $(H_0 - h_0)$. Teníase

$$M_0 - a\,(H_0 - h_0), \qquad \text{de donde} \qquad a = \frac{M}{H_0 - h_0}.$$

Sólo faltaba llevar estos coeficientes á la ecuación anterior [1] para deducir de ahí el calor específico desconocido C (salvo las correcciones).

4°. *Correcciones de conductibilidad y de radiación.* — La operación precedente se complicaba por la necesidad de determinar los datos necesarios para efectuar las correcciones relativas al aumento de calor por conductibilidad y á la pérdida por radiación.

Sea K la variación de temperatura que ocurre por *minuto*, en consecuencia de la conductibilidad; sea m_1 la constante de radiación [1], definida por la ley de Newton: la variación de temperatura *por minuto*, á consecuencia de la radiación, será $m_1(\theta - t)$, siendo θ la temperatura del calorímetro y t la temperatura ambiente. La variación total, debida á estas dos causas, será en consecuencia por *minuto*,

$$\Delta\theta = -K + m(\theta - t).$$

Si se conocieran K y m, bastaría tener en cuenta la duración del experimento para conocer la suma $\Delta\theta$, que constituye el enfriamiento total.

Regnault observaba las temperaturas durante 10 minutos consecutivos antes del experimento, quiere decir, antes del paso del gas. Dividiendo por 10 la variación de temperatura total observada, se obtiene la variación media, por minuto, antes de la experiencia. Sea $\Delta\theta$ esta variación observada: puede escribirse

$$\Delta\theta' = -K + m(\theta' - t').$$

Al fin del experimento se repite *en blanco*, es decir, sin que haya paso del gas. Sea $\Delta\theta'$ la variación media observada; también se puede escribir

$$\Delta\theta'' = -K + m(\theta'' - t'').$$

Estas dos ecuaciones determinan los coeficientes K y m.

Hecho esto, he aquí cómo se las utilizará para calcular la corrección total $\Delta\theta'$. Sean θ_1 y t_1 las temperaturas simultáneas del calorímetro y de la atmósfera ambiente durante el primer minuto; el descenso de temperatura durante este primer minuto se obtendrá evidentemente aplicando la fórmula general de corrección. Resultará

$$\Delta\theta_1 = -K + m(\theta_1 - t_1).$$

El enfriamiento durante el segundo minuto estará dado también por

$$\Delta\theta_2 = -K + m(\theta_2 - t_2),$$

y así sucesivamente, hasta el último minuto, para el cual se tendrá

$$\Delta\theta_x = -K + m(\theta_x - t_x).$$

Efectuando la suma de estos enfriamientos sucesivos, se tendrá evidentemente el enfriamiento total $\Delta\theta$, por la fórmula

$$\Delta\theta = -Kx + m\left[\Sigma(\theta_i) - \Sigma(t_i)\right].$$

Observación. — 1°. Este método de corrección se aplica también á la determinación de los calores específicos de los cuerpos sólidos y líquidos por el método de las mezclas; pero no había motivo para utilizarlo en el caso de los sólidos y de los líquidos, porque la operación duraba demasiado poco, apenas 2 ó 3 minutos.

2°. Aquí la experiencia dura por lo menos 10 minutos. No obstante esto, la corrección así calculada era siempre demasiado pequeña, unos 0°,02; este es el carácter distintivo de todos los trabajos de Regnault.

473. **Resultados generales.** — 1°. Regnault determinó por este método los calores específicos de los principales gases, entre 0° y 200° y bajo presión constante, próxima á una atmósfera.

2°. Para todos ellos encontró calores específicos muy inferiores á 1, menos el del hidrógeno, que es superior á 3. El del aire es igual á 0,237. El más pequeño es el del cloro, igual á 0,121.

1. m es el descenso de temperatura por minuto para un exceso de temperatura (sobre el medio ambiente) igual á 1°.

3°. También observó Regnault que para el aire y para los gases considerados en condiciones distantes de su punto de liquefacción, el calor específico es independiente de la presión constante, así como de los límites de temperatura. Por ejemplo : el del aire es rigurosamente constante desde — 30° hasta 225°.

4°. El calor específico es variable con la temperatura y con la presión en todos los gases liquidables ó que no obedecen á la ley de Mariotte.

5°. La ley de los calores atómicos (ley de Dulong) no se realiza con los gases ó se realiza de manera imperfecta.

CALORES DE FUSIÓN Y DE VAPORIZACIÓN.

674. **Calor de fusión : Definición y métodos de medida.** — Se ha visto que cuando los cuerpos pasan sea del estado sólido al líquido, sea del líquido al sólido, hay desaparición ó reaparición de una cantidad de calor más ó menos considerable.

Actualmente se llama *calor de fusión* de un cuerpo sólido al número de calorías necesarias á 1 gramo de este cuerpo para pasar del estado sólido al líquido *sin elevación de temperatura.*

El calor de fusión se determina por dos métodos :

1°. El *método de las mezclas,* sucesivamente aplicado por Regnault, La Provostaye y Desains y por Person ;

2°. El *método del calorímetro de hielo* (de Bunsen).

675. **Método de las mezclas** (caso de una sustancia cualquiera). — Determínase el calor de fusión de los cuerpos por el método de las mezclas, admitiendo que, cuando un cuerpo en estado líquido se solidifica, devuelve una cantidad de calor rigurosamente igual á la que había absorbido durante la fusión.

Fúndese un peso M del cuerpo y después de tomar su temperatura de fusión T, se le echa en el agua fría, cuyo peso m y temperatura t son conocidos. Llamemos c el calor específico del cuerpo en el estado sólido, l su calor de fusión, y θ la temperatura final que adquiere el agua calentada por el cuerpo. Como la masa de agua se ha calentado de t á θ grados, ha absorbido una cantidad de calor representada por $m(\theta - t)$; el cuerpo ha cedido, por una parte, al enfriarse de T á θ, una cantidad de calor $Mc(T - \theta)$, y por otra, en el momento de la solidificación, una cantidad de calor representada por Ml. Tiénese, pues, la ecuación

$$Mc(T - \theta) + Ml = m(\theta - t),$$

de donde

$$l = \frac{m(\theta - l) - Mc(T - \theta)}{M}.$$

Observación. — Á esta ecuación pueden aplicarse todas las correcciones anteriormente indicadas para el método de las mezclas.

676. **Experiencias de Person.** — Person aplicó este método á la determinación de gran número de calores de fusión. Aumentaba la precisión del mismo considerando la sustancia, no á su temperatura de fusión T, sino á otra τ superior á T : de manera que la sustancia tenía que enfriarse de τ^0 á T^0 antes de hacerse só

lida. Precisaba, pues, conocer un coeficiente más, á saber el calor específico C de la sustancia en estado líquido. La ecuación de la experiencia era pues

$$MC'(\tau - T) + Ml + MC(T - \theta) = m(\theta - t).$$

En general, C' era tan desconocido como l. Entonces se efectuaba otra experiencia, con pesos diferentes M_1 y m_1 de la sustancia y de agua : esto suministraba una segunda ecuación que, unida á la precedente, permitía despejar las dos incógnitas l y C'.

Entre los números que este físico obtuvo, citaremos el calor de fusión del hielo, igual á 79,25 cal.

677. **Calor de fusión del hielo.** — El calor de fusión del hielo es el que más interesa conocer, por causa de las aplicaciones de que puede ser objeto. Se le determina también por el método de las mezclas.

Black fué quien tuvo la primera idea de efectuar esta medida.

Tómase un peso M de hielo á cero y otro m de agua caliente á t grados, bastante para fundir todo el hielo. Arrójase éste en el agua y así que la fusión es completa, se mide la temperatura final de la mezcla. Si la representamos por θ, como el agua se ha enfriado, cedió una cantidad de calor igual á $m(t-\theta)$. Cuanto al hielo, si se expresa por l su calor de fusión, consume para fundirse una cantidad de calor Ml, aunque permaneciendo á la temperatura 0°; pero además, después de la fusión, el agua procedente de ella se calienta hasta θ grados y gana entonces una cantidad de calor igual á $M\theta$. Tiénese, pues, la ecuación

$$Ml + M\theta = m(t - \theta),$$

de donde se deduce el valor de l.

Black halló como tal el número 80.

Experiencias de La Provostaye y Desains.— La Provostaye y Desains emplearon el mismo método, aunque con algunas correcciones suplementarias. Por ejemplo : el fragmento de hielo era enteramente puro, estaba exactamente á 0°, y además lo enjugaban muy bien con papel secante. Una vez así las cosas, se le introducía en un calorímetro cuya temperatura inicial era algo más elevada que la ambiente, de modo que la temperatura final θ fuera algo más baja, en el mismo número de grados (método de compensación). Por fin, lo que daba con exactitud el peso M del hielo fundido era el aumento de peso del calorímetro

De esta manera hallaron el número 79,25 cal.

678. **Calor de vaporización.** — 1°. *Definición.* — Se ha visto que los líquidos absorben al vaporizarse, una cantidad de calor considerable. Desígnase por el nombre de *calor de vaporización* de un líquido *al número de calorías que absorbe 1 gramo de este líquido para convertirse en vapor, sin que suba la temperatura.*

2°. *Determinación.* — Para determinar el calor de vaporización de un líquido se admite que su vapor al liquidarse deja en libertad una cantidad de calor precisamente igual á la que había absorbido para formarse.

Úsase el mismo método experimental que para la determinación de

los calores específicos de los gases. Este método ha sido aplicado sucesivamente por Despretz y Regnault.

679. **Experiencias de Despretz.** — 1°. *Aparato y operación.* — El vapor se produce en una retorta C (fig. 636) donde está indicada la temperatura por un termómetro, y se dirige á un serpentín sumergido en agua fría, donde cede su calor latente condensándose. El agua que resulta de la condensación va á parar á un recipiente P, donde el serpentín termina; de ahí se la saca al fin de la experiencia para pesarla; su peso es igual al del vapor que ha circulado en el

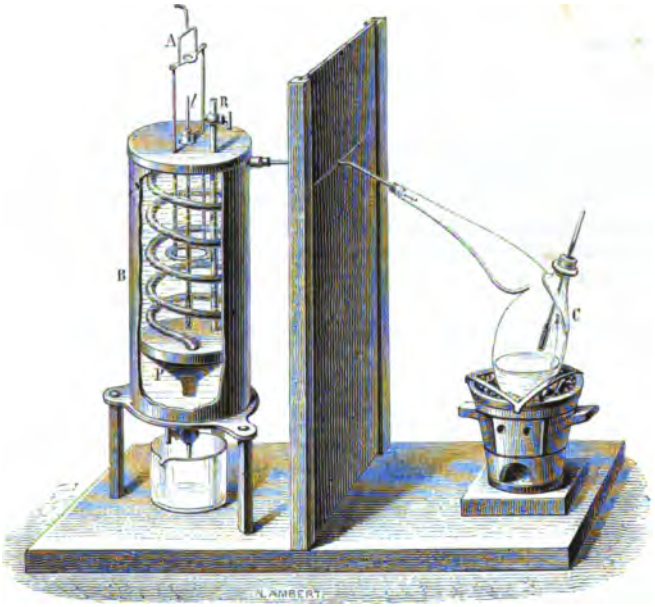


Fig. 636.

aparato. Un agitador A, que se mueve á mano, sirve para mezclar las capas de agua en el vaso B, de modo que toda la masa se encuentre á la misma temperatura. Ésta se conoce por un termómetro *t* dispuesto en el eje del serpentín. Por fin, del recipiente P arranca un tubo de llave R por el cual se puede modificar la presión y en consecuencia la temperatura del vapor; esto se obtiene poniendo en comunicación al aparato sea con una máquina neumática, sea con una bomba de compresión.

2°. *Cálculo de la experiencia.* — Sean M el peso del vapor condensado, T la temperatura que ese vapor tenía antes de entrar en el serpentín y λ su calor de vaporización. Sean análogamente *m* el peso

del agua contenida en el serpentín, μ los pesos del vaso H del serpentín, del termómetro y del agitador *reducidos al agua*, t la temperatura inicial de este líquido, y θ su temperatura final. El calor cedido por los M kilogramos de vapor, por el simple hecho de la condensación, es $M\lambda$; además, el peso de agua M, al enfriarse desde T hasta θ, pierde una cantidad de calor igual á $M(T-\theta)$: luego, la cantidad total de calor cedida por el vapor es $M\lambda + M(T-\theta)$. Por lo demás, el calor adquirido por el agua, el vaso y los accesorios es $(m+\mu)(\theta-t)$; luego se tiene

$$M\lambda + M(T-\theta) = (m+\mu)(\theta-t),$$

de donde

$$\lambda = \frac{(m+\mu)(\theta-t) - M(T-\theta)}{M},$$

2°. *Resultados.* — Este método se aplica á todos los líquidos. El agua era el que presentaba mayor interés, por causa de las aplicaciones de su vapor. De esta manera obtuvo Despretz como calor de vaporización del agua á 100° el número 540.

Regnault, que repitió estas medidas por un método muy perfeccionado, halló el número 537.

680. **Calor total de vaporización. — Fórmulas empíricas de Regnault.** — Si al calor de vaporización del agua á 100° se añade la cantidad de calor necesaria para llevar 1 kilogramo de agua de 0° á 100°, es decir, 100° calorías, esta suma (igual á 637) representa el *calor total de vaporización del agua* á 100°.

Esta noción se extiende á todas las temperaturas á que se puede vaporizar el agua ó cualquier otro líquido. Llámase *calor total de vaporización* á T° de un líquido, la cantidad de calor que precisa comunicar á 1 gramo de este líquido para llevarlo desde su punto de fusión al estado de vapor á T°.

Respecto del agua en particular Regnault llegó en sus experimentos á la conclusión siguiente: Q es una función de T, representada por la fórmula empírica

$$[1] \qquad Q = 606{,}5 + 0.305\,T.$$

Se ve que *el calor total de vaporización del agua aumenta* á medida que la temperatura *sube*. Así, se eleva desde 606,5 cal. á 0° hasta 637 cal. á 100° y 667,5 cal. á 200°.

Fórmula empírica de λ. — Por el contrario, el calor latente *disminuye* cuando la temperatura *sube*. En efecto, si λ es el calor latente de vaporización á la temperatura T, tiénese evidentemente

$$[2] \qquad \lambda = Q - T = 606{,}5 - 0{,}695\,T.$$

Baja desde 606,5 cal. á 0° hasta 537 cal. á 100° y 467,5 cal. á 200°.

681. **Calor de vaporización de los gases liquidados.** — 1°. *Experiencias de Favre y Silbermann.* — El trabajo más antiguo es el de Favre y Silbermann sobre el ácido sulfuroso. Estos físicos hicieron hervir ácido sulfuroso líquido á la presión atmosférica en la mufla de su calorímetro de mercurio. El peso del líquido vaporizado está dado por la medida del volumen del gas recogido, y la cantidad de calor absorbida, por la retrogradación del mercurio en el vástago calibrado del calorímetro. Así se obtiene de manera sencilla aunque poco exacta el calor de vaporización de un cuerpo á su temperatura de ebullición bajo la presión atmosférica.

2°. *Experiencias de M. J. Chappuis.* — El método de Favre y Silbermann ha sido perfeccionado por M. J. Chappuis. Este físico logró, gracias al empleo del calorímetro de hielo de Bunsen, que la vaporización se efectuara á 0°, y evitó la expansión obligando al vapor á conservar sensiblemente la tensión máxima á

esta temperatura. El tubo de desprendimiento del gas se encuentra pegado con mástic en una llave que sirve para regularizar y dirigir la ebullición; el peso del gas salido del aparato se obtiene pesando el aparato de vaporización antes y después del experimento. La vaporización del peso p observada mide únicamente el peso de vapor saturado *que sale* del instrumento; de ahí se deduce el peso π de líquido vaporizado por la fórmula

$$\pi = p \frac{\delta}{\delta - \delta},$$

en la cual δ y δ' son las densidades del líquido y del vapor saturado del cuerpo sometido á la experiencia, á la temperatura *cero* de ésta. Sea m el volumen á 0° del mercurio que ha vuelto á entrar en el calorímetro; el calor de vaporización está dado por

$$L = \frac{1}{K} \frac{m}{\pi},$$

siendo K una constante del aparato. Las experiencias de M. J. Chappuis se refirieron al cloruro de metilo, al ácido sulfuroso, al ácido carbónico y al cianógeno. Para el ácido sulfuroso y el ácido carbónico, el factor de corrección $\frac{\delta}{\delta - \delta'}$ ha sido calculado por medio de las experiencias de Cailletet y Mathias; respecto de los otros gases, en que este factor tiene poca importancia, la densidad δ' del vapor saturado se calculó por la aplicación de la ley de Mariotte y de la ley de Gay-Lussac.

3°. *Experiencias de E. Mathias.* — El uso del *calorímetro de agua*, combinado con el *método calorimétrico de temperatura constante* [664] permitió á M. Mathias estu-

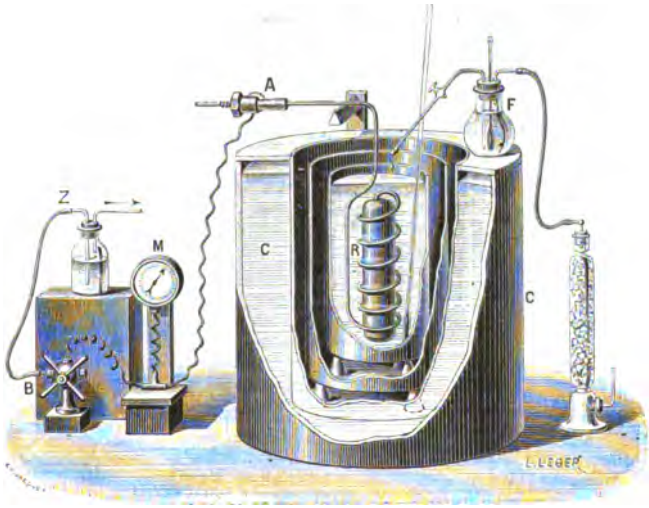


Fig. 637.

diar, entre 0° y 35° la variación con la temperatura del calor de vaporización de los gases liquidados.

El depósito de gas liquidado es un recipiente cilíndrico de cobre R (fig. 637) que puede resistir á más de 100 atmósferas, y que comunica por la parte superior con un largo serpentín de pequeño diámetro arrollado en torno de aquél. El conjunto se introduce en un calorímetro Berthelot CC y está *dorado por fuera*, á fin de evitar el ataque del ácido. El serpentín se encuentra soldado á una llave A, que

comunica, por medio de una prolongación y de un tubo de cobre idéntico al del serpentín, con otra llave análoga B de grandes dimensiones.

El aislamiento térmico del recipiente R se obtiene por medio de una prolongación de *celuloide*, una de cuyas extremidades se adapta, por un anillo de tornillo, en un lado de la llave A, atornillándose el otro extremo en un tubo de latón soldado á su vez con el tubo de desprendimiento del gas.

El aparato comprende además un frasco de vidrio F lleno de ácido sulfúrico, cuyo calor de dilución es conocido y que está cerrado herméticamente. Durante todo el tiempo de la vaporización del líquido, se hace correr gota á gota en el calorímetro el ácido sulfúrico, teniendo cuidado de mezclar las capas de agua con el termómetro calorimétrico. De esta manera se puede, con algunas precauciones, mantener la temperatura constante con aproximación de algunos centésimos de grado. La llave B sirve para arreglar la salida, cuya regularidad pone de manifiesto un agitador de glicerina Z. La disminución de peso del recipiente R permite

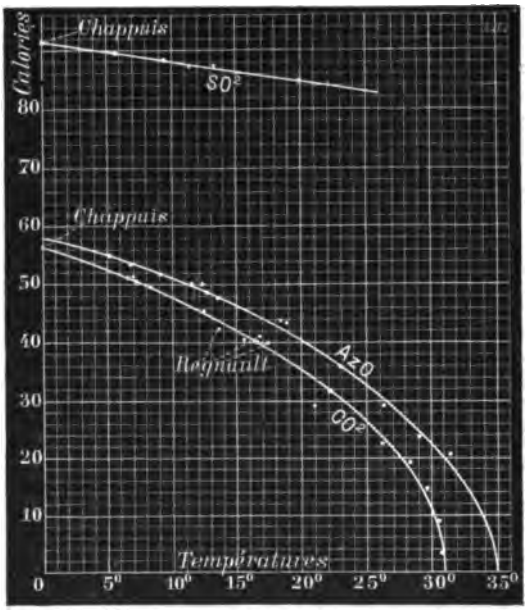


Fig. 638.

calcular, como en los experimentos de M. J. Chappuis, el peso del líquido vaporizado; la pérdida de peso del frasco de ácido permitía también conocer el calor desarrollado por la dilución del ácido sulfúrico en el agua del calorímetro. Teníanse, pues, los datos necesarios para calcular el calor de vaporización del gas liquidado á la temperatura constante t^0 del agua del calorímetro. Las variaciones anuales de la temperatura permitían estudiar el calor de vaporización entre 0^0 y 22^0 próximamente. En los experimentos efectuados por encima de la temperatura ambiente, se modificaba por necesidad el método anterior.

Las experiencias de M. Mathias se refirieron al ácido sulfuroso, al carbónico y al protóxido de nitrógeno, y con estos últimos llegó hasta proximidad de la temperatura crítica. Para estos tres cuerpos y en los límites de temperatura considerados, el calor de vaporización de crece constantemente, según indica la figura 638. Este descenso es lineal en el ácido sulfuroso; pero en el ácido carbónico y el protóxido de nitrógeno es sumamente rápido.

Las curvas precedentes, que resumen el trabajo de M. Mathias, hacen ver que en el punto crítico el calor de vaporización es rigurosamente nulo, pues la tangente á la curva $\lambda = f(t)$ es perpendicular al eje de las abscisas.

La fórmula siguiente,

$$\lambda^2 = 117{,}803\,(31 - t) - 0{,}466\,(31 - t)^2,$$

representa el calor de vaporización del ácido carbónico desde la temperatura crítica hasta temperaturas inferiores á 0°,

682. **Calor emitido en las reacciones químicas.** — **Calor de combustión.** — Llámase *calor de combustión* de un cuerpo á la cantidad de calor que se desprende en la combustión de la unidad del mismo. Así el del hidrógeno que arde en el oxígeno es de 34462, según Fabre y Silbermann; cuando se combina con el cloro es de 23783. El del diamante que arde en el oxígeno es 7770.

Varios físicos, y en particular Lavoisier, Rumford, Despretz, Dulong, Hess, Silbermann y Fabre, Berthelot, se han ocupado en medir los calores de combustión y de combinación. Hoy se utilizan generalmente los calorímetros de Berthelot para este género de trabajos. Ya hemos descrito el calorímetro ordinario; he aquí la bomba calorimétrica usada en ciertos casos.

683. **Bomba calorimétrica de M. Berthelot.** — Este aparato, bastante pequeño para poder ser sumergido en el agua de un calorímetro (fig. 639), está formado por un depósito de acero R, forrado interiormente con una hoja de platino; y que puede cerrarse con una tapadera de tornillo C. En su centro y perpendicularmente á su plano, la tapadera lleva un tubo dentro del cual puede dar vueltas una llave de tornillo *r* cuyo canal se ve en la figura. Junto á este tubo hay un alambre de platino *f*, perfectamente aislado del aparato, que penetra dentro de la cavidad y va á terminar cerca de la pared. Gracias á él se puede provocar la chispa eléctrica que deberá provocar la reacción por vía seca cuyo des-

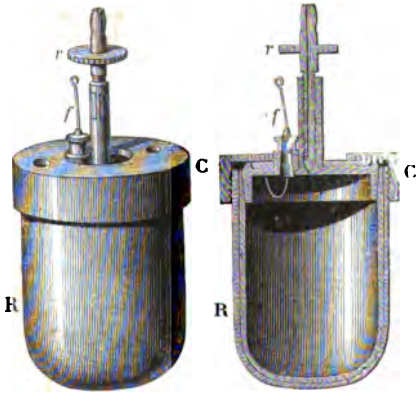


Fig. 639.

Fig. 640.

prendimiento de calor se quiere medir. Si se quema una materia sólida, por ejemplo carbono, se la coloca en una pequeña cápsula de platino colgada por un alambre metálico y se determina su inflamación por el paso de una corriente á través de un alambre de platino muy delgado puesto en contacto con el cuerpo. Para que la combustión sea completa, es necesario llenar la bomba con un exceso de oxígeno comprimido á la presión de unas 25 atmósferas.

684. **Pirheliómetro** (de Pouillet). — Pouillet apropió una especie de calorímetro de agua á la medida del calor que emite el sol (fig. 640).

1°. *Aparato.* — El calorimetro propiamente dicho es una caja cilíndrica C de cobre ó de plata de paredes delgadas. La cara superior, que debe estar expuesta al sol, se cubre con negro de humo, de manera que la absorción sea máximum; la cara inferior está fija por su centro en un tubo hueco T, que sirve de sostén; éste pasa á su vez por un collar de charnela *cc* que permite comunicarle á mano un doble movimiento de rotación y, por tanto, orientarlo convenientemente. Este movimiento es facilitado por un disco D del mismo diámetro que la caja, dispuesto perpendicularmente en el soporte.

2°. *Operación.* — Se opera del modo siguiente: 1°. Colócase el intrumento á la sombra y se observa su variación de temperatura θ durante 5 minutos; 2°. Se le coloca al sol, orientándolo normalmente á la dirección de los rayos y se toma nota de la elevación de temperatura T durante 5 minutos; 3°. Se vuelve á llevar el aparato á la sombra, y se observa su enfriamiento θ' durante 5 minutos. De ahí se puede deducir que la elevación de temperatura propia debida sólo á la acción del sol, durante 5 minutos, es

$$T = \frac{\theta' \pm \theta}{2}.$$

Ponemos $\pm\,\theta$, porque la variación de temperatura durante la primera fase de la experiencia, puede ser ya un enfriamiento, ya un aumento de calor. Llamando M el peso del agua, aumentado con el *calorímetro reducido al agua*, se tiene evidentemente para la cantidad de calor recibida en 5 minutos

$$Q = M\left(T + \frac{\theta' \pm \theta}{2}\right),$$

r. este número se debe añadir la cantidad de calor interceptada por la atmósfera antes de que los rayos lleguen al aparato. Pouillet efectuaba esta corrección por medio de una fórmula *empírica* relativa á la *absorción atmosférica.*

3°. *Resultados.* — Pouillet descubrió que *si la cantidad total de calor que la Tierra recibe del Sol en el transcurso de un año se empleara toda entera en fundir hielo, sería capaz de reducir á líquido una capa de hielo de* 31,87 *m. de grueso, que cubriera la superficie total del globo.* Pero, según la superficie que la Tierra presenta á la radiación del Sol, y según la distancia que separa estos astros, aquélla no recibe sino próximamente $\frac{1}{138\,000\,000}$ del calor emitido por el Sol.

4°. *Temperatura del Sol.* — También se ha procurado determinar la temperatura del Sol. Partiendo de una serie de experimentos efectuados con el actinómetro, Violle admite que la temperatura media del sol es de 2500°.

Fundándose en las modificaciones que experimentan las rayas del espectro á medida que sube la temperatura, M. Crova admite 4000°. Por fin, el P. Secchi creía en 9 á 10 millones de grados.

Tan enormes diferencias indican suficientemente que el problema no está resuelto todavía.

CAPÍTULO XIII

CONDUCTIBILIDAD CALORÍFICA DE LOS SÓLIDOS, DE LOS LÍQUIDOS Y DE LOS GASES.

685. **Propagación del calor por conductibilidad.** — El calor de un foco calorífico se comunica á los restantes cuerpos de dos modos, por *conductibilidad* y por *radiación*. La *conductibilidad* es la propiedad que tienen los cuerpos de *transmitir el calor de molécula en molécula á través de su masa.*

No todos los cuerpos conducen igualmente bien el calor. Llámase *buenos conductores* á los que lo transmiten fácilmente: tales son los metales; y *malos conductores* á los que lo transmiten con más ó menos lentitud, como la madera, el vidrio, las resinas, las sustancias orgánicas y sobre todo los líquidos y los gases.

Estos últimos se usan mucho, sea para preservar á los cuerpos calientes del enfriamiento exterior, sea para impedir que se calienten los cuerpos fríos. Por esto se conservará caliente mucho tiempo un líquido guardándole en un vaso doble, cuyo intervalo esté lleno de materias no conductoras, serrín, vidrio machacado, carbón en polvo, paja, etc.; por esto se conserva el hielo durante el verano envolviéndolo en paja ó en una manta de lana.

686. **Conductibilidad de los sólidos.** — *Experiencia de Ingenhousz.* — Ingenhousz comparó los sólidos de modo muy sencillo, en lo relativo á conductibilidad, valiéndose de una cajita de latón (fig. 641) donde se fijan, en golletes de tapones, unas barritas de diversas sustancias, hierro, cobre, madera y vidrio; estas barras penetran algunos milímetros en lo interior de la caja; por la parte exterior se las cubre de cera amarilla. Cuando se llena la caja de agua hirviendo, obsérvase que la cera se funde en las barritas metálicas distancia mayor ó menor, mientras que en las otras no hay señales ningunas de fusión: la conductibilidad es tanto mayor cuanto más distante se encuentra el punto hasta donde se funde la cera.

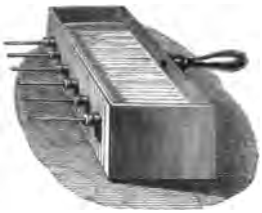


Fig. 641.

687. **Coeficientes de conductibilidad. — Teoría de Fourier.** — Fourier determinó por el cálculo las condiciones que permiten medir con exactitud los *coeficientes de conductibilidad*, quiere decir, unos coeficientes numéricos que caracterizan á las diferentes sustancias desde el punto de vista de su conductibilidad.

1°. *Problema de la barra.* — Primero resolvió el problema de la conductibilidad en una barra prismática supuesta *bastante delgada* para que todos los puntos de una misma sección transversal se encontraran en el mismo momento *á idéntica temperatura*, y *bastante larga* para que, mantenida una de sus puntas á temperatura constante más ó menos elevada, la otra conservara calor igual al de la temperatura ambiente. Esto fué lo que llamó el *problema de la barra.* Habiendo tomado como incógnita el exceso de temperatura θ sobre la ambiente de una capa situada á distancia x del foco, halló la fórmula

$$\theta = Ne^{-ax},$$

en que N es una constante que representa el exceso de temperatura en el origen (es decir en el punto para el cual $x = 0$), e la base de los logaritmos neperianos y a un coeficiente que es *constante* para una misma sustancia.

2°. *Problema del muro.* — Esta constante no es el coeficiente de conductibilidad propiamente dicho, pero está enlazada con este coeficiente por una relación sencilla. Fourier descubrió esta relación estudiando el *problema del muro*, quiere decir, la conductibilidad del calor en una pared hecha de la misma sustancia que la barra, de grueso finito, y cuyas dos caras, paralelas é infinitas, son mantenidas á excesos de temperatura constantes t y t_1.

Así definió el *coeficiente de conductibilidad* diciendo que es la cantidad de calor que atraviesa en la unidad de tiempo la unidad de superficie de una capa cualquiera del muro, paralela á las caras.

Sean a' y a las *constantes* de dos barras de sustancias diferentes, K y K' los coeficientes de conductibilidad correspondientes; estas cuatro cantidades están enlazadas por la ecuación $\frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2}$, con tal que las superficies exteriores de las barras tengan *el mismo poder emisivo* ó, según se dice, la misma *conductibilidad exterior*. Esta condición se realiza cubriéndolas con una delgada capa del mismo barniz.

Los experimentos de Despretz, y después los de Wiedemann y Franz han permitido medir las constantes a y a', y por consiguiente los cocientes $\frac{K}{K'}$, con mucha precisión.

688. **Experiencias de Despretz.** — *Aparato.* — Practícanse de decímetro en decímetro en una barra prismática pequeñas cavidades, que se llenan de mercurio y en cada una de las cuales se introduce el depósito de un pequeño termómetro (fig. 642). Cuando se expone la barra

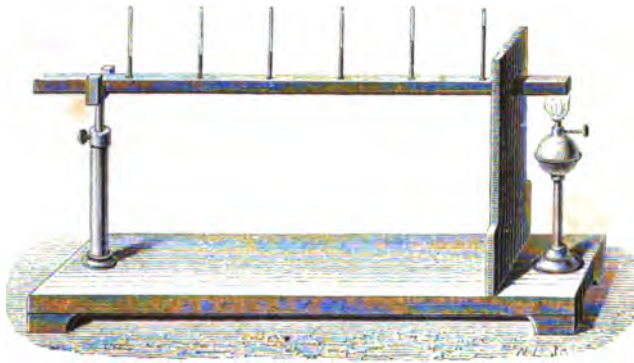


Fig. 642.

por una de sus puntas á un foco de calor que le comunique temperatura constante, se ve que los termómetros suben sucesivamente á partir del foco, á temperaturas fijas, que decrecen de un termómetro al siguiente.

De esta manera descubrió Despretz una ley relativa á los metales buenos conductores (oro, plata, cobre); esa ley se deduce por lo demás de las fórmulas de Fourier:

Tratándose de puntos cuyas distancias al foco crecen en progresión aritmética, los excesos de temperatura disminuyen en progresión geométrica.

También dedujo de sus experiencias los coeficientes de conductibilidad relativos de diferentes sustancias.

Sea, en efecto, [1] $t = Ne^{-ax}$ la fórmula correspondiente á la primera barra. De ahí se deduce que, á las distancias 1, 2, 3..., los excesos de temperatura t_1, t_2, t_3..., son

$$Ne^{-a}, \quad Ne^{-2a}, \quad Ne^{-3a}..$$

se ve por consiguiente que los excedentes sucesivos forman una progresión geométrica cuya razón es e^{-a}: es la ley antes enunciada.

Sean ahora t_n y t_{n+1} dos términos consecutivos de la serie; dividiéndolos miembro á miembro, se tendrá la inversa de la razón e^a: hagamos $e^a = p$.

Si se efectúa el mismo cálculo para otra barra, de análoga conductibilidad exterior, se tendrá $e^{a'} = p'$.

Pasando á los logaritmos vulgares, resultará

$$a \log e = \log p \qquad \text{y} \qquad a' \log e = \log p',$$

de donde

$$\frac{a'}{a} = \frac{\log p'}{\log. p}, \quad \text{de donde por fin} \quad \frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2} = \left(\frac{\log p'}{\log p}\right)^2,$$

Representando por 1000 el coeficiente de conductibilidad del oro, el mencionado físico halló los números siguientes:

Platino	981	Hierro	374	Plomo	179
Plata	973	Zinc	363	Mármol	23
Cobre	897	Estaño	304	Porcelana	12

689. **Experiencias de Wiedemann y Franz.** — Al practicar cavidades en la superficie de las barras, Despretz destruía parcialmente la continuidad de los metales. Wiedemann y Franz evitaron este inconveniente, midiendo los excesos de temperatura por medio de un *elemento termo-eléctrico*, que aplicaban sucesivamente á los diferentes puntos de las barras.

Las barras metálicas eran lo más regular posibles y se encontraban en un sitio de temperatura constante. Una de ellas estaba en comunicación con un foco calorífico á temperatura constante.

Operando de este modo, Wiedemann y Franz obtuvieron resultados muy diferentes de los de Despretz.

Plata	1000	Estaño	145	Plomo	85
Cobre	736	Hierro	119	Platino	84
Oro	532	Acero	116		

Observación. — Estos números representan también con escasísima diferencia, el orden de *conductibilidad eléctrica* de estos metales.

690. **Conductibilidad de los líquidos.** — La conductibilidad de los líquidos es sumamente escasa: únicamente se exceptúa el mercurio, que es un metal.

Rumford llegaba á admitir que la conductibilidad de los líquidos era *nula*. Sin embargo, Murray probó que calentando un líquido por la capa superficial, las inferiores aumentaban poco á poco de temperatura, aun en un vaso hecho con *hielo á cero*, y cuyas paredes no conducían el calor.

Experiencias de Despretz. — Despretz repitió esta experiencia, demostrando que el calor se propaga realmente por conductibilidad en los líquidos.

Su aparato consistía en un tonel de 1,15 m de alto, lleno de agua y cerrado en su parte superior por un vaso de cobre A (fig. 643). Á lo largo de una misma duela del tonel se practican los agujeros donde se colocan los termómetros. Una corriente de agua, calentada á 100° llega lentamente al vaso A por un tubo C, y

sale de aquél por otro tubo D. Mantenido de esta manera el vaso á temperatura constante, la capa de aire que se halla en contacto con sus paredes es la primera

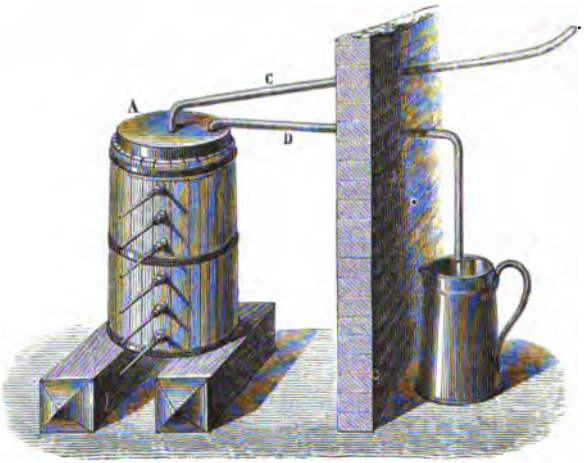


Fig. 643.

que se calienta; después sigue la capa inmediatamente inferior, y así sucesivamente hasta cierta profundidad: esto es lo que indican los termómetros; su temperatura se hacía estacionaria y permanecía de este modo durante las 36 horas próximamente que se tardaba en cada experimento. Despretz halló que el calor se propaga en los líquidos siguiendo la misma ley que en las barras metálicas; pero que su conductibilidad es incomparablemente menor.

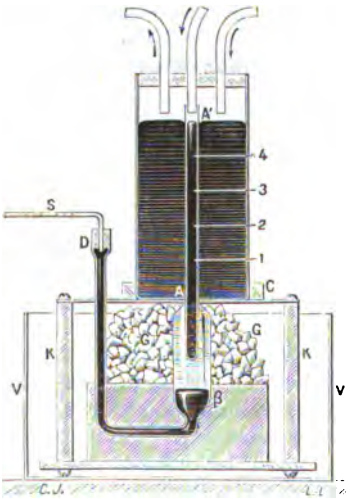


Fig. 644.

691. **Experiencias de M. A. Berget.** — 1°. *Principio.* — Según el problema *del muro* y la definición del coeficiente de conductibilidad K (687,2°), la cantidad Q de calor que atraviesa durante el tiempo x una sección s considerada en una pared de grueso l, cuyas dos caras se mantienen á las temperaturas θ y θ' tiene por expresión

$$Q = K\, s\, \frac{(\theta' - \theta)}{l} \,.\, x.$$

M. Berget utilizó esta fórmula en la medida de K.

2°. *Aparato.* — La sección de muro está formada por un cilindro de mercurio que llena la mufla AA' de un calorímetro Bunsen (fig. 644). Sus dos extremos A y A' se encuentran respectivamente á la temperatura del hielo fundente y á la del vapor de agua hirviendo.

El calorímetro permite medir el calor Q que le lleva la columna de mercurio,

durante un tiempo x contado en el cronómetro. La sección s de la mufla se conoce por aforo : calcúlase $\frac{\theta' - \theta}{l}$ obteniendo el cociente de la diferencia de las temperaturas de dos secciones por la distancia que las separa. Esta diferencia de temperaturas se mide por medio de un par termo-eléctrico *hierro-mercurio* estudiado previamente. En 1, 2, 3, 4 se ven los alambres de estos pares, cuya extremidad desnuda penetra en el mercurio de la mufla.

Á fin de que no haya *pérdida lateral* y de que la mufla se encuentre en las mismas condiciones que si formara parte de una pared de mercurio indefinida, M. Berget tuvo la ingeniosa idea de rodearla de un ancho cilindro lleno de mercurio, que llamó *cilindro de guardia*, y al cual se debe el buen éxito del método.

3°. *Resultados. — Justificación del método.* — En el curso de sus experiencias justificó M. Berget su método demostrando la distribución lineal de las temperaturas dentro de la pared de Fourier así realizada.

También reconoció que los tiempos necesarios para el establecimiento del régimen permanente en dos paredes de la misma naturaleza, pero de gruesos diferentes, son proporcionales á los cuadrados de los gruesos de esas paredes.

Conductibilidad del mercurio. — M. Berget ha hallado como coeficiente de conductibilidad k del mercurio el valor 0,2015 (en unidades C. G. S.)

Conductibilidad de los metales. — M. Berget realizó su método, extendiéndolo á la conductibilidad de los sólidos. Superponiendo á un cilindro de metal, provisto de su anillo de guardia, y cuya base inferior se encuentra en contacto con hielo fundente, el cilindro de mercurio anterior, cuya cara libre es calentada por una corriente de vapor, es claro que se establecerá un *régimen permanente* en que las cantidades de calor que atraviesan dos secciones iguales de las dos paredes durante el mismo tiempo serán iguales. Tendráse pues

$$Ks\,\frac{\theta' - \theta}{l}\,x = K's\,\frac{\theta'_1 - \theta_1}{l_1}\,x, \quad \text{de donde si } l = l_1, \quad K' = K.\,\frac{\theta' - \theta}{\theta'_1 - \theta_1}. \qquad [1]$$

Por consiguiente, si se toma nota por medio del par termo-eléctrico de las diferencias de temperaturas relativas á dos secciones de las dos paredes, separadas por la misma distancia, se conocerá el valor de

$$\frac{\theta' - \theta}{\theta'_1 - \theta_1}.$$

Como K es conocido, entonces la ecuación [1] permitirá calcular K'.

M. Berget halló por este método los siguientes valores de K'.

Cobre	1,0405	Hierro	0,1587	Antimonio	0,0420
Zinc	0,303	Estaño	0,151	Bismuto	0,0201
Latón	0,2625	Plomo	0,0810	Mercurio	0,02015

692. **Conductibilidad de los gases.** — No es posible estimar directamente la conductibilidad de los gases por causa de su considerable poder (709) y de la extremada movilidad de sus moléculas; pero cuando se encuentran impedidos en sus movimientos, su conductibilidad parece *ser casi nula*.

De experimentos de Magnus resulta que el hidrógeno es el único gas á que se puede atribuir conductibilidad propia para el calor, comparable á la de los metales [1].

693. **Transporte.** — En los líquidos y los gases hay que distinguir un segundo modo de la propagación del calor por conductibilidad. Efectivamente, en ellos esa propagación se efectúa además *por un cambio de lugar de las moléculas*, efectuado por corrientes interiores

1. Más adelante veremos que también tiene esta conductibilidad para la electricidad.

debidas á la dilatación, y por consiguiente á la variación de densidad de las capas que se encuentran en contacto inmediato con el foco de calor. Es fácil poner de manifiesto estas corrientes ascendentes, en un líquido que se calienta por debajo, echando en él una sustancia ligera y pulverulenta, como serrín de madera. Los físicos ingleses han caracterizado esta manera de propagarse el calor llamándola *convection* (transporte). Como la conductibilidad propiamente dicha es muy pequeña en los líquidos y en los gases, el calor se transmite en su masa casi exclusivamente por transporte. Y si las sustancias filamentosas, paja, algodón, plumón, pieles, etc., presentan mucha resistencia á la conductibilidad, es porque suprimen la propagación por transporte en la masa de aire que encierran é inmovilizan en sus intersticios.

CAPÍTULO XIV

CALOR RADIANTE.

PROPAGACIÓN DEL CALOR POR RADIACIÓN.

694. **Definiciones preliminares.** — *Radiación y absorción del calor.* — Cuando un cuerpo está colocado en un recinto de temperatura más ó menos elevada que la suya, se observa siempre que la temperatura del cuerpo sube ó baja progresivamente, hasta quedar al mismo nivel que la del ambiente; de donde se deduce que el cuerpo ha *ganado* ó *perdido* cierta cantidad de calor, *sustraída* al medio ambiente ó *cedida* al mismo. De manera que el calor se transmite de un cuerpo á otro á través del espacio. Este modo de propagación, que se efectúa á todas las distancias y en todas direcciones, se designa por el nombre de *radiación;* y se llama *absorción* lo inverso de la radiación, es decir, la penetración del calor radiante en los cuerpos.

Cuerpos calientes y *cuerpos fríos.* — Los cuerpos llamados vulgarmente *cuerpos calientes* no son los únicos que emiten calor, ni los *cuerpos fríos* los únicos que lo absorben. Todos los cuerpos, calientes ó fríos, emiten y absorben constantemente calor, aunque en cantidades desiguales.

Calor radiante ó *radiación calorífica.* — Cuando se considera al calor propagándose por radiación, se llama *calor radiante* ó *radiación calorífica.*

Rayo calorífico y *haz calorífico.* — Por fin, llámase *rayo de calor* ó *rayo calorífico* á la línea según la cual se propaga el calor, y *haz* á un conjunto de rayos. Si éstos se apartan unos de otros, el haz es *divergente ;* si son paralelos, el haz es también *paralelo.*

Calor luminoso y calor oscuro. En el estudio del calor radiante hay que distinguir el *calor ó radiación oscura* y el *calor ó radiación luminosa:* el primero es emitido por cuerpos no luminosos, tales como un vaso lleno de agua á 100°, y el segundo por los cuerpos luminosos, como el sol ó los metales incandescentes.

695. **Caracteres físicos de la radiación.** — La radiación se distingue claramente de la conductibilidad en los caracteres siguientes:

1°. *La radiación se efectúa en todas las direcciones alrededor de los cuerpos.* — En efecto, si se coloca un termómetro en diferentes puntos alrededor de un cuerpo caliente, experimenta en todos esos puntos elevación de temperatura.

2°. *En un medio homogéneo, la radiación ocurre en línea recta.* — Efectivamente, si se interpone una pantalla pequeña en la línea recta que une un foco calorífico con el depósito de un termómetro, éste deja de estar bajo la acción del foco.

Pero al pasar de un medio á otro, por ejemplo del aire al vidrio, los rayos caloríficos cambian de dirección, como los luminosos: dícese también de ellos que *se refractan.*

3°. *El calor radiante se propaga en el vacío.* — La presencia de un medio ponderable no parece necesaria á la radiación del calor. En efecto, en lo tocante al calor luminoso, la propagación en el vacío está demostrada por la radiación del sol á través de los espacios planetarios; y en lo relativo al calor oscuro, Rumford la probó.

El depósito de un termómetro *t* (fig. 645) estaba colocado en el centro de un matraz, en el vacío barométrico; desde que se le exponía á la acción de un foco de calor oscuro, por ejemplo, en el agua caliente, el mercurio subía casi en el acto. Luego el calor oscuro se propaga en el vacío, pues el vidrio es demasiado mal conductor para que la propagación se efectúe con esa rapidez siguiendo las paredes del matraz y el vástago del termómetro.

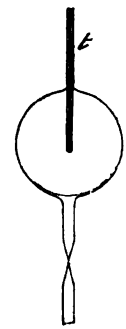


Fig. 645.

4°. *Velocidad de propagación del calor radiante.* — La velocidad de propagación del calor no ha sido determinada : sábese únicamente que debe diferir poco de la velocidad de la luz, si no le es rigurosamente igual.

5°. *Intensidad del calor radiante y de la luz.* — El carácter esencial del calor radiante, carácter que resume todos los demás, es su identidad con la luz, demostrada experimentalmente por el estudio de todas sus propiedades y de las leyes que las rigen.

696. **Intensidad del calor radiante y de la luz. — Leyes.** — Llámase *intensidad* de un foco calorífico á la *cantidad de calor* que éste envía *normalmente, á la unidad de distancia, sobre la unidad de superficie* del cuerpo calentado.

Tres circunstancias pueden modificar la cantidad de calor enviada

sobre una superficie dada por un foco calorífico de intensidad constante, á saber : la distancia del foco de calor, la oblicuidad de los rayos caloríficos respecto de la superficie que los emite, y su oblicuidad relativamente á la superficie que los recibe.

1ª Ley. — *La cantidad de calor enviada por radiación normalmente sobre una superficie dada varía en razón inversa del cuadrado de la distancia de esta superficie al foco.*

Esta ley puede demostrarse, sea por razonamiento, lo mismo que en el caso de la luz, sea de manera experimental, por medio del aparato de Melloni, que más adelante describiremos.

No se aplica sino á los rayos caloríficos *divergentes*; en lo relativo á rayos *paralelos, la cantidad permanece siendo la misma á todas las distancias*, haciendo abstracción de la absorción por los medios que el calor atraviesa.

2ª Ley. — *Ley del coseno* (ó de Lambert). — *La cantidad de calor emitido oblicuamente por una superficie radiante es proporcional al coseno del ángulo que forman los rayos con la normal á la superficie.*

Esta ley, descubierta por el físico Lambert, no es general; Desains ha probado que no se cumple sino en el caso muy limitado de los cuerpos *desprovistos de poder reflector*, como el negro de humo (703).

3ª Ley. — *La cantidad de calor enviada oblicuamente sobre una superficie dada por un foco constante, es proporcional al coseno del ángulo que forman los rayos incidentes con la normal á esta superficie.*

Demostración. — Esta ley se puede demostrar *a priori*.

En efecto, sea un foco A de intensidad constante i (fig. 646) y sea primeramente ac la porción de superficie que recibe normalmente el haz calorífico incidente. La

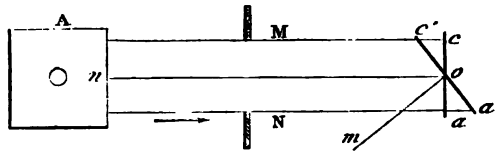


Fig. 646.

cantidad de calor q recibida por la unidad de superficie en ac será $q = \frac{\quad}{\text{superf. } ac}$.

Si se inclina la superficie, la porción $a'\ c'$, correspondiente á ac, recibirá la misma cantidad de calor; pero como este calor se encuentra repartido sobre una superficie mayor, la cantidad recibida por la unidad de superficie disminuirá necesariamente, y se tendrá $q' = \frac{i}{\text{surperf. } a'\ c'}$. De estas dos igualdades se deducirán dos valores para i,

$$i = q' \times \text{superf } a'\ c' = q \times \text{superf } ac,$$

de donde se saca

$$q' = q\ \frac{\text{superf } ac}{\text{superf } a'\ c'},$$

y como superf ac = superf $a'\ c'$ cos mon, resulta $q' = q$ cos mon.

Observación — La primera ley podría demostrarse por un razonamiento análogo.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

697. **Velocidad de enfriamiento : Ley de Newton.** — Las consecuencias necesarias de la radiación calorífica son, por una parte la elevación de temperatura de los cuerpos exteriores al foco, y por otra el enfriamiento de éste.

Un cuerpo en el vacío no se enfría más que por radiación. En la atmósfera contribuye además al mismo resultado su contacto con el aire; en ambos casos se llama *velocidad media de enfriamiento* al descenso *de su temperatura durante a unidad de tiempo.*

1°. *Enfriamiento en el vacío.* — Newton enunció la ley siguiente sobre el enfriamiento de los cuerpos *en el vacío : La velocidad media de enfriamiento de un cuerpo es proporcional al excedente medio de su temperatura sobre la del ambiente.*

Llamando θ al excedente inicial, θ' al excedente final, x al tiempo transcurrido y m á una constante, la ley de Newton se expresa por la ecuación

$$\frac{\theta - \theta'}{x} = m\left(\frac{\theta \times \theta'}{2}\right).$$

El coeficiente constante m se llama la *constante de enfriamiento.*

Dulong y Petit demostraron experimentalmente que esta ley no es general y que *sólo* puede aplicarse á excedentes de temperatura que no pasan de 20° á 30°. Más allá, la velocidad de enfriamiento es superior á lo que la ley indica.

Observación. — *Velocidad de calefacción.* — Si en vez del enfriamiento de los cuerpos se considera su calefacción, la ley de Newton se aplica también y en los mismos límites.

2°. *Enfriamiento en los gases.* — La velocidad de enfriamiento en los gases es tanto mayor cuanto más considerable es la diferencia de las temperaturas entre el medio ambiente y el cuerpo caliente. Es mayor en los gases que en el vacío y varía con la naturaleza de los gases : por ejemplo, en el hidrógeno es mayor que en el aire. Por fin, depende también del poder emisivo del cuerpo caliente y de la presión de la atmósfera que lo rodea.

Consecuencia. — Cuando un cuerpo está expuesto á un foco de calor constante, su temperatura no podría elevarse indefinidamente ; pues la cantidad de calor que recibe en la unidad de tiempo es siempre la misma, mientras que la que pierde crece al mismo tiempo que el exceso de temperatura sobre la del aire ambiente. Llega, pues, un momento en que *la cantidad de calor absorbida es igual á la emitida* y la temperatura del cuerpo que se calienta permanece entonces *estacionaria.*

698. **Equilibrio móvil de temperatura ó Hipótesis de Prevost.** — Se han emitido dos hipótesis sobre la transmisión de calor por radiación. Primero se supuso que cuando dos cuerpos de temperaturas desiguales están en presencia, hay radiación únicamente desde el cuerpo más caliente hacia el más frío, y que no ocurre radiación

inversa. Pensábase que este estado debía durar hasta que la temperatura del cuerpo más caliente llegara á ser igual á la del más frío, cesando entonces toda radiación.

Esta hipótesis ha sido reemplazada por la siguiente, que se debe á Prévost, de Ginebra. Todos los cuerpos, sea cual fuere su temperatura, emiten y reciben constantemente calor en todas direcciones. Entonces hay *pérdida*, quiere decir *enfriamiento* para aquellos cuya temperatura es más elevada, porque los rayos que emiten son más intensos que los que reciben. Por el contrario, hay *ganancia*, es decir *elevación de temperatura*, para aquellos que la tienen menos elevada. De este modo llega un momento en que la temperatura es idéntica de parte y parte; pero entonces el cambio de calor entre los cuerpos no cesa, y como cada uno de ellos recibe tanto como emite, la temperatura permanece constante en todas partes. Esta situación particular es la que se llama *equilibrio móvil de temperatura*.

REFLEXIÓN Y DIFUSIÓN. — PODERES REFLECTOR Y DIFUSIVO. PODERES ABSORBENTE Y EMISIVO.

699. **Reflexión del calor radiante. — Leyes.** — Cuando un haz calorífico incide en la superficie de un cuerpo, parte más ó menos grande de sus rayos *se refleja*.

La reflexión del calor radiante está sometida á las mismas leyes que la de la luz :

1°. *El rayo incidente* SI *y el rayo reflejado* IR (fig. 647) *se encuentran en un mismo plano perpendicular á la superficie reflectora.*

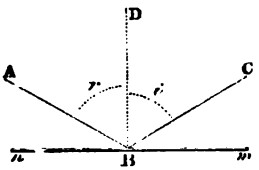


Fig. 647.

2°. *El ángulo de reflexión* RIN *es igual al ángulo de incidencia* SIN.

Demostración experimental. — Estas leyes se demuestran sea directamente por medio del *termomultiplicador* de Melloni, sea indirectamente por todas las consecuencias geométricas que de ellas se deducen, entre otras por la experiencia de los *espejos ustorios*.

1°. *Experiencias de Melloni.* — *Aparato.* — En una regla horizontal metálica MN (fig. 648), de un metro de largo y dividida en milímetros, y sólidamente colocada sobre una peana de tornillos de nivel, se fijan diferentes piezas por medio de tornillos de presión : esto es lo que se llama el *banco de calor radiante*. En S se encuentra un foco de calor, que consiste, ya en un alambre de platino calentado hasta la temperatura del blanco en la llama de una lámpara de alcohol, llamada *platino incandescente*, sea un cubo de latón lleno de agua á 100°, que se denomina *cubo de Leslie* (fig. 650). En K hay una pantalla entera que intercepta cuando se la sube, los rayos de calor

procedentes del foco; en F hay otra pantalla, agujereada en su centro, que sirve para dejar libre el paso á un haz paralelo. En la otra extremidad de la regla se encuentra un vástago I, que sostiene un círculo graduado cuyo cero corresponde á la direción de la regla MN y, por tanto, del haz *Sm*. El círculo tiene en su centro un agujero donde da vueltas un eje que sostiene un espejo metálico plano *m*. En torno del vástago I gira libremente una regla R, en la cual está

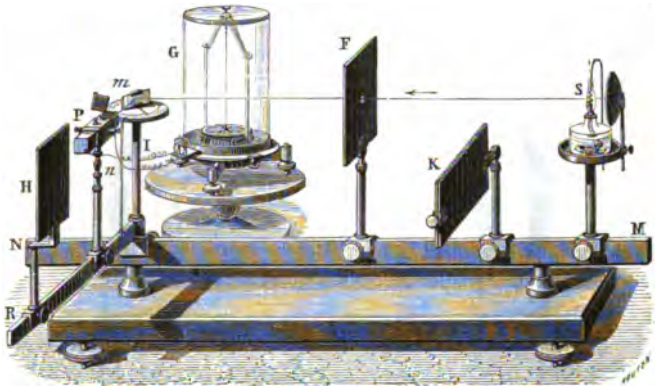


Fig. 648.

fijo el termomultiplicador propiamente dicho, constituído por una pila termoeléctrica P, que comunica con su galvanómetro G. Entre la pila y el círculo graduado hay un vástago *n*, encorvado en su extremo hacia el borde del círculo graduado, y que marca en éste los movimientos angulares de la regla. Por fin, una pantalla acodillada H[1], sostenida por la regla, sirve para interceptar los rayos de calor que van directamente del foco á la pila, de modo que ésta sólo reciba los reflejados.

Experiencia. — Bájase la pantalla K (fig. 648) : entonces pasa un haz de calor por el agujero de la pantalla F, incide sobre el espejo *m* y se refleja en él. Si la regla no se encuentra en la dirección del haz reflejado, éste no va á dar en la pila, y el galvanómetro queda en el cero; mas si se da vuelta lentamente á la regla, llégase á una posición *en que el galvanómetro indica una desviación máximum*, lo que ocurre cuando la pila recibe de lleno el haz reflejado. Ahora bien, si entonces se toma nota de la posición que ocupa en el círculo graduado una pequeña aguja paralela á la normal en el punto de incidencia, se observa *que divide en dos partes iguales al ángulo formado por el haz incidente y el reflejado*, lo cua demuestra la segunda ley.

La primera queda demostrada por la misma experiencia; pues las piezas del aparato están dispuestas de modo que los rayos incidentes y reflejados se encuentren en un mismo plano, que es horizontal y, por consiguiente, perpendicular á la cara vertical del espejo.

1. En el dibujo no se ha puesto la pantalla en el sitio que debe ocupar, á fin de no ocultar la pila.

2°. *Experiencia de los espejos ustorios.* — Pictet y Saussure efectuaron por primera vez en Ginebra este experimento, que ha recibido el nombre de *experiencia de los espejos conjugados* ó de los *espejos ustorios*. Mediante él se prueba la existencia de los focos *caloríficos* de los espejos cóncavos, demostrándose en consecuencia que las leyes de la reflexión del calor son idénticas á las de la luz.

Dispónense á 4 ó 5 metros de distancia dos reflectores M y N (fig. 649), de modo que sus ejes coincidan. En el foco de uno de ellos se coloca un manantial calorífico *de dimensiones muy pequeñas* (en general esto se realiza mal mediante un enrejado de alambre de hierro lleno de carbones hechos ascua); en el foco del otro se pone

Fig. 649.

un cuerpo inflamable B, por ejemplo yesca. Los rayos emitidos por el foco A se reflejan primeramente en el espejo M, paralelamente al eje; después van á reflejarse por segunda vez en el otro reflector, reuniéndose en su foco B. Así lo prueba la circunstancia de inflamarse el pedazo de yesca colocado en ese punto, mientras que aquende y allende el foco no se enciende.

700. **Espejos ustorios.** — Por causa de la elevada temperatura que se puede obtener en los focos de los espejos cóncavos, se les ha dado el nombre de *espejos ustorios* (del latín *ustor*, *ustoris*, el que quema). Cuéntase que Arquímedes incendió los barcos romanos delante de Siracusa por medio de aparatos de esta clase.

Buffon construyó espejos ustorios cuya potencia probaba la posibilidad del hecho atribuido á Arquímedes. Los fabricó reuniendo gran número de espejos planos y estañados, de 22 centímetros de largo por 16 de ancho. Se podía volverlos en tal ó cual dirección, independientemente unos de otros, de tal modo que los rayos reflejados en cada uno de ellos fueran á reunirse en el mismo punto.

Con un sistema de 128 espejos logró Buffon, un día caloroso de verano, incendiar de este modo una tabla de madera alquitranada, distante 68 metros.

Recibiendo los rayos solares en un espejo de latón batido, de 1 metro de alto y de un radio de curvatura de 2 metros, se obtiene en el foco calor tan intenso, que en unos cuantos minutos se funden metales como el cobre y la plata.

701. **Reflexión aparente del frio.** — Si se colocan dos reflectores uno frente á otro (fig. 649) poniendo en el foco de M no carbones incandescentes sino un pedazo de hielo ó una mezcla frigorífica, estando el aire ambiente á 12 ó 15°, un termómetro situado en el foco del otro reflector desciende varios grados por debajo de esta temperatura.

Este fenómeno se atribuyó antaño á rayos frigoríficos emitidos por el hielo y reflejados por los espejos. Pero esta *reflexión aparente del frío*, como la llamaban, se explica naturalmente por la hipótesis del equilibrio móvil de temperatura.

Así debe explicarse la sensación de frío que se siente junto á las paredes de yeso, de piedra ó de cualquier otra masa cuya temperatura sea inferior á la de nuestro cuerpo.

702. **Reflexión irregular, ó Difusión del calor radiante.** — La *reflexión regular* (que podría llamarse también *reflexión especular*) viene acompañada, como en el caso de la luz, de *reflexión irregular* ó *difusión*.

La reflexión regular se produce en superficies pulimentadas; la irregular en las rugosas, tales como las placas no pulimentadas de vidrio ó de metal.

La difusión del calor fué estudiada por Melloni con el termomultiplicador. Recíbese en una superficie metálica opaca ó cubierta de albayalde un haz de calor; ahora bien, sea cual fuere la inclinación ó cualquiera el lado de que se dirige la pila del termomultiplicador hacia el punto de incidencia, la aguja del galvanómetro se desvía más ó menos desde que los rayos caloríficos encuentran la superficie reflectora: lo cual prueba que hay calor reflejado en todas direcciones y bajo todas las inclinaciones.

703. **Poder reflector.** — I. *Definiciones.* — El *poder reflector* de una sustancia es su propiedad de reflejar una parte más ó menos grande del calor incidente.

Mídese el poder reflector por *la razón de la cantidad de calor reflejada á la de calor incidente.* Á esta razón ó cociente es á lo que se da propiamente el nombre de *poder reflector absoluto.*

II. *Determinación experimental.* — 1°. *Experiencias de Leslie.* — Leslie llamaba *poder reflector* al cociente entre la cantidad de calor reflejada por un cuerpo y la que refleja otro cuerpo-tipo, que ordinariamente era el cobre amarillo pulimentado. Este físico determinó de manera experimental el poder reflector de varias sustancias. Por ejemplo, representando por 100 el poder del cobre amarillo pulimentado, halló 90 para la plata, 70 para el acero, 10 para el vidrio, y 0 para el negro de humo.

2°. *Experiencias de Melloni.* — Melloni fué quien primero determinó, por medio del termomultiplicador, el *poder reflector absoluto* de cierto número de sustancias. Desains continuó estas medidas perfeccionando los procedimientos.

3°. *Experiencias de P. Desains.* — El aparato de Melloni estaba dispuesto según indica la fig. 648. Después de retirar la placa *m*, se daba vuelta á la regla R hasta ponerla en la prolongación de la MN: como la pila recibía directamente el calor del foco, la aguja del galvanómetro se desviaba, llegando, pongamos por ejemplo, á 18 grados. Después se colocaba en el círculo graduado una placa *m*, bien pulimentada, del metal cuyo poder reflector se quería averiguar, y se daba vuelta á la regla hasta que la pila recibiera el calor reflejado por la placa : entonces el galvanómetro marcaba una desviación menor, por ejemplo 15 grados. De consiguiente, el poder absoluto de la placa era, por definición, igual á $\frac{15}{18}$.

Resultados. — De esta manera averiguó Desains los poderes *absolutos* siguientes, *para una incidencia de* 30 *grados:*

Plaqué de plata.	0,97	Acero.	0.82
Oro.	0,95	Zinc	0,81
Latón y cobre rojo.	0,93	Hierro.	0,77
Platino.	0,83	Hierro colado.	0,74

704. **Poder difusivo.** — Llámase *poder difusivo absoluto* de una sustancia (para el calor) á la razón que existe entre la cantidad total de calor difundida en todas direcciones y la cantidad de calor incidente.

El poder difusivo depende del *foco de calor* y de la *superficie reflectora.* Con el negro de humo, los metales y el vidrio pulimentado es tan escaso que se le puede despreciar. Con los metales mates, el vidrio sin pulimentar, el papel y el blanco de albayalde, el poder difusivo es más ó menos grande, según el manantial de calor.

705. **Poder absorbente.** — I. *Definiciones.* — Los cuerpos tienen la propiedad de dejar penetrar en su masa una porción más ó menos grande del calor incidente ; exprésase esta propiedad diciendo que poseen un *poder absorbente* para el calor. Mídense, sea los poderes absorbentes *absolutos,* sea los poderes absorbentes *relativos.*

El *poder absorbente relativo* es la razón que existe entre la cantidad de calor absorbida por un cuerpo y la que absorbería en las mismas condiciones otro cuerpo que se tomara como término de comparación. El *poder absorbente absoluto* es la razón entre el calor absorbido y el calor incidente.

Experiencias de Melloni. — Melloni determinó los *poderes absorbentes con relación al negro de humo,* por medio de su termomultiplicador. Para ello fijaba delante de la pila placas de cobre delgadas : la cara que miraba á la pila estaba cubierta de negro de humo, mientras que la expuesta al foco de calor (cubo á 100°) se cubría de la sustancia que se trataba de estudiar. El calor incidente era absorbido de manera distinta según la naturaleza del unto, y las placas de cobre radiaban de manera desigual hacia la pila; entonces el

galvanómetro marcaba desviaciones diferentes, de donde se deducían los poderes absorbentes. He aquí algunos de sus resultados:

Negro de humo.	100	Tinta de China.	85
Blanco de albayalde.	100	Goma laca	72
Cola de pescado.	91	Metales	13

II. *Poderes absorbentes absolutos.* — Estos experimentos prueban que mientras más calor refleja un cuerpo, menos absorbe, y recíprocamente. Pero los dos poderes no son exactamente complementarios, porque el calor incidente se divide en realidad en tres porciones: 1°. una que es absorbida y calienta el cuerpo; 2°. otra que es reflejada regularmente; 3°. una que se refleja irregularmente. Además, para cierto número de cuerpos hay que considerar una cuarta porción, que los atraviesa sin calentarlos (709).

Representemos por la unidad la intensidad del haz calorífico incidente, por a el poder absorbente absoluto de un cuerpo, por r su poder reflector absoluto, por d su poder difusivo absoluto; tiénese evidentemente, para los cuerpos que no se dejan atravesar por el calor,

$$a + r + d = 1. \qquad [1]$$

Con los metales pulimentados, cuyo poder difusivo es muy escaso, la igualdad anterior se reduce á

$$a = 1 - r. \qquad [2]$$

Con las sustancias como los metales mates, el papel, cuyo poder reflector es muy pequeño, se convierte en

$$a = 1 - d. \qquad [3$$

Por fin, cuando el poder reflector y el difusivo son despreciables al mismo tiempo, tiénese sensiblemente $a = 1$; esto ocurre con el negro de humo.

706. **Poder emisivo.** — 1°. *Definiciones.* — El *poder emisivo* de los cuerpos es su propiedad de emitir, á temperatura y superficie iguales, cantidades de calor más ó menos grandes. No se consideran sino los

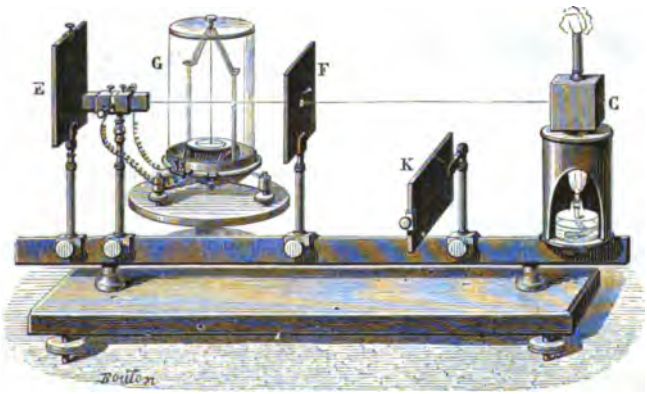


Fig. 650.

poderes emisivos relativos: llámase *poder emisivo relativo* de una sustancia á la relación que existe entre la cantidad de calor que emite, en ciertas condiciones de temperatura, de superficie y de medio

ambiente, la cantidad de calor que emitiría en idénticas condiciones otra sustancia que se tomara como tipo de comparación.

La sustancia tipo, universalmente adoptada, es el *negro de humo.*

2°. *Experiencias de Melloni.* — Melloni determinó los poderes emisivos tomando también como foco calorífico el cubo de Leslie (fig. 650) : una de las caras estaba cubierta de negro de humo y las otras de diferentes sustancias. Dicho físico dirigía sucesivamente sobre la pila los rayos emitidos por estas diferentes caras y tomaba nota de las desviaciones correspondientes del galvanómetro. Comparando esos números dedujo los poderes emisivos siguientes:

Negro de humo.	100	Tinta de China.	85
Blanco de albayalde.	100	Goma laca	72
Cola de pescado.	91	Superficies metálicas.	12

3°. *Experiencias de Desains.* — P. Desains continuó estas experiencias valiéndose del termomultiplicador; representando por 100 el poder del negro de humo, halló los siguientes números para los metales:

Platino laminado.	10,50	Oro en hojas.	4,28
— bruñido	9,50	Plata virgen laminada. . . .	3,00
Plata mate depositada químicamente	5,36	— pura bruñida	2,50
Cobre en planchas.	4,95	— depositada químicamente y bruñida	2,25

707. **Comparación de los poderes absorbentes con los emisivos.** — 1°. *Ley de Leslie.* — *Experiencia de Ritchie.* — Leslie dedujo de sus experimentos que el *poder emisivo de un cuerpo*, respecto del negro de humo, *es siempre igual á su poder absorbente relativo*, quiere decir que si una sustancia emite 2 veces, 3 veces más calor que el negro de humo, también absorbe 2, 3 veces más.

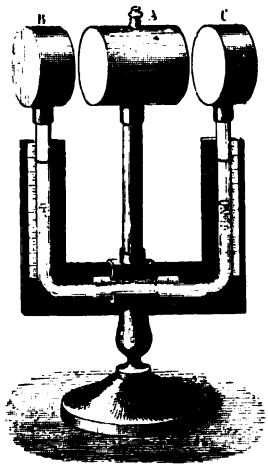


Fig. 651.

Durante mucho tiempo se admitió como general esta ley; pero Kirchhoff probó que los poderes emisivo y absorbente de una misma sustancia no varían en la misma relación cuando la temperatura se eleva ó si cambia el foco calorífico.

Con estas restricciones, la ley de Leslie se demuestra por medio de la siguiente experiencia, imaginada por Ritchie.

El aparato consiste en una especie de termómetro diferencial, constituido por dos depósitos cilíndricos B y C de metal, y llenos de aire (fig. 651), reunidos por medio de un tubo de dos brazos que contiene agua. Entre ellos está otro depósito A, mayor, de la misma forma, que se puede llenar de agua caliente por un gollete; además A es móvil y puede acercarse más ó menos á B ó C. Finalmente, las bases de estos tres cilindros, que se miran unas á otras, están alternativamente cubiertas de plaqué de plata y de negro de humo, de manera que las dos caras presentes estén, plateada una y ennegrecida la otra. Por consiguiente, la cara plateada de A radia hacia la negra de B, y la negra de A hacia la plateada de C. Una vez lleno de agua caliente el depósito A, se observa que si está situado á igual distancia de B

y de C, la columna líquida *permanece estacionaria* y *á la misma altura* en ambas ramas, lo cual prueba que los depósitos B y C absorben la misma cantidad de calor.

Ahora bien, si representamos por a y e los poderes absorbente y emisivo absolutos del negro de humo, por a' y e' los de la plata, como la cantidad de calor absorbida por B es al mismo tiempo proporcional á a y á e', se puede expresarla por $a \times e'$; análogamente, el calor absorbido por C está representado por $a' \times e$. Puede, por tanto sentarse

$$a \times e' = a' \times e, \quad \text{de donde} \quad \frac{a}{a'} = \frac{e}{e'},$$

igualdad que expresa de manera general que *los poderes absorbentes absolutos son proporcionales á los poderes emisivos absolutos.*

Debe observarse que las dos condiciones restrictivas de la ley de Leslie quedan satisfechas en la experiencia de Ritchie.

En general, todas las causas *que modifican* el poder emisivo, *alteran en el mismo* sentido el poder absorbente.

708. **Aplicaciones.** — La propiedad que tienen los cuerpos de absorber, de reflejar ó de emitir más ó menos calor en idénticas circunstancias, tiene numerosas aplicaciones en la economía doméstica y en las artes.

Usos domésticos. — Por ejemplo, tratándose de los vasos donde se calientan los líquidos, tales como las cafeteras, sería ventajoso que la superficie fuera negra y estuviera sin pulimentar, puesto que así aumentaría el poder absorbente. De manera que el pulimento que de ordinario se les da disminuye la absorción y aumenta el gasto de combustible. Por el contrario, cuando se trata de mantener mucho tiempo un líquido á temperatura elevada, debe ponérsele en un vaso de metal pulimentado y brillante, como las teteras de plata, pues como entonces el poder emisivo es menor, será más lento el enfriamiento.

709. **Poderes diatermanos.** — I. *Definiciones.* — *Diatermaneidad.* — Varios cuerpos dejan pasar el calor á través de su masa, así como los cuerpos transparentes dejan pasar la luz: tales son el aire, la sal gema, el vidrio. Otras sustancias, como los metales, son impermeables al calor. Melloni llamó *sustancias diatermanas* á las primeras y *sustancias atermanas* á las segundas. La propiedad descrita se denomina *diatermaneidad;* corresponde á la *transparencia* en la luz.

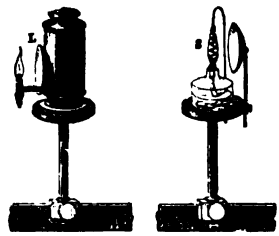


Fig. 652. Fig. 653.

Poder diatermano. — Llámase *poder diatermano* de una sustancia á *la relación* que existe entre la cantidad de calor que *deja* pasar y la que *recibe.*

II. *Determinación.* — *Experiencias de Melloni.* — Melloni determinó los poderes diatermanos por medio de su termomultiplicador. Al efecto empleó cinco focos de calor *de temperaturas diferentes :*

1°. La *lámpara de Locatelli*, lámpara sin tubo, con reflector y de una sola corriente de aire (fig. 652);

2°. La *lámpara de Argand*, lámpara de doble corriente de aire y provista de un tubo ;

3°. El *platino incandescente*, alambre de platino arrollado en forma de hélice y mantenido á la temperatura del rojo blanco en la llama de una lámpara de alcohol (fig. 648);

4°. El *cobre* á 400°, placa de cobre ennegrecida exteriormente y calentada hasta 400° próximamente por la llama de una lámpara de alcohol (fig. 653);

5°. El *cubo de Leslie*, cubo de cobre rojo, ennegrecido por la parte exterior y lleno de agua á 100° (fig. 650).

Los tres primeros focos dan *calor luminoso*, y los dos últimos *calor oscuro*.

El termomultiplicador estaba colocado según indica la figura 654. Las sustancias con que se experimentaba se hacían en placas de grueso variable, y se fijaban en *o* sobre un sostén H. Los rayos caloríficos las atravesaban, yendo á incidir sobre la pila P, é imprimían á la aguja del galvanómetro una desviación que medía el calor transmitido. Comparando esta desviación con la que se obtiene directamente cuando se retira la placa, se calcula el poder diatermano de ésta.

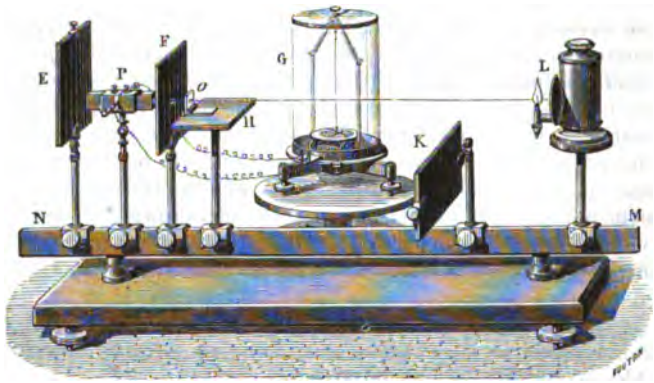


Fig. 654.

710. **Resultados relativos á los poderes diatermanos.** — *Influencia de la naturaleza del foco y de la sustancia de la pantalla.* — Los poderes diatermanos dependen no sólo de la naturaleza de la sustancia, sino también de la del foco. Así resulta claramente del cuadro que sigue.

SUSTANCIAS	LÁMPARA de Locatelli	PLATINO incandescente	COBRE calentado hasta 400°	COBRE calentado hasta 100°
Sal gema	92	92	92	92
Espato de Islandia	39	28	6	0
Vidrio para espejos	39	24	6	0
Cristal de roca	37	18	6	0
Cal sulfatada	14	5	0	0
Alumbre	9	2	0	0
Hielo puro	6	0	0	0

Influencia del grueso de la pantalla. — La experiencia prueba que *la cantidad de calor que atraviesa una pantalla disminuye cuando aumenta su grueso;* pero la absorción no es *proporcional* al grueso, pues donde se produce sobre todo es en las primeras capas.

Diatermaneidad de la sal gema. — El cuadro anterior prueba que el calor luminoso es más transmisible que el oscuro, excepto en la sal gema, cuyo poder diatermano permanece constante é igual á 92, sea cual fuera el foco de calor. Melloni admitía además que este número es independiente del grueso de la placa; pero P. Desains ha demostrado que el poder diatermano de la sal gema *disminuye* cuando el grueso *aumenta* y cuando la temperatura del manantial de calor *baja.*

Diatermaneidad de la silvina. — Magnus observó además que la *silvina* (cloruro de potasio) tiene un poder diatermano *igual por lo menos al de la sal gema para todos los manantiales de calor.*

711. — **Diatermaneidad de los gases.** — Melloni admitía que *todos los gases son perfectamente diatermanos;* pero Tyndall descubrió que mientras el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno tienen un poder diatermano *tan escaso que sólo absorben una cantidad apenas perceptible del calor que los atraviesa,* los gases compuestos, como el ácido sulfuroso, el gas amoniaco, el gas olefiante, interceptan casi por completo el calor, aun cuando su tensión es apenas de unos cuantos centímetros de mercurio.

Diatermaneidad del aire. — Habiendo experimentado con aire húmedo, Tyndall observó que absorbe 70 veces más calor que el seco; de donde dedujo naturalmente que el primero tiene poder absorbente mucho mayor que el segundo. Pero los experimentos de Magnus, y de Wild han probado que la diferencia de absorción no se debe al vapor de agua sino *al vapor condensado en las paredes del tubo.*

712. **Consecuencias y aplicaciones de los poderes diatermanos.** — 1°. El poder diatermano de las capas superiores de la atmósfera es la causa de que estén siempre á baja temperatura, no obstante los rayos solares que las atraviesan.

2°. Como el agua es poco diatermana, en el seno de los mares y de los lagos se produce el fenómeno inverso: las capas superiores participan de las variaciones de temperatura, según las estaciones, mientras que á cierta profundidad permanece constante el grado de calor.

3°. Las propiedades de los cuerpos diatermanos se han utilizado para separar la luz y el calor que irradian juntos del mismo foco. Así, la sal gema cubierta de negro de humo detiene completamente la luz y deja pasar el calor oscuro. Por el contrario, placas ó disoluciones de alumbre interceptan el calor, sin dejar por esto de ser

transparentes. Úsaselas con ventaja en las iluminaciones de luz eléctrica ó solar, cuando es necesario evitar calor demasiado intenso. El yodo disuelto en el bisulfuro de carbono produce efecto inverso : absorbe los rayos luminosos y deja pasar el calor oscuro.

4°. El uso de las campanas de vidrio con que se cubren en los jardines ciertas plantas, y el empleo de estufas calientes ó frías se fundan en la diatermaneidad del vidrio. En el cuadro precedente se ha visto que esta sustancia (diatermana para el calor luminoso de los rayos solares) es absolutamente *atermana* para el calor oscuro que irradia del suelo.

713. **Análisis de las radiaciones caloríficas. — Termocrosis.** — Así como Newton demostró la existencia de varias especies de luz, el *rojo*, el *anaranjado*, el *amarillo*, el *verde*, el *azul*, el *índigo* y el *violado*, así probó Melloni la existencia de diversas clases de rayos caloríficos, emitidos simultáneamente, en proporciones variables, por los diversos manantiales de calor y dotados de la propiedad de atravesar más ó menos fácilmente las sustancias diatermanas. Estas poseen pues una verdadera *coloración* calorífica, quiere decir que absorben ciertos rayos de calor y dejan pasar los otros, del mismo modo que un vidrio azul, pongamos por ejemplo, es atravesado por la luz azul y no por lo demás colores. Melloni llamó *termocrosis* á esta especie de *coloración calorífica* de los cuerpos diatermanos.

CAPÍTULO XV

APLICACIÓN DE LAS LEYES DEL CALOR. — CALEFACCIÓN Y VENTILACIÓN.

714. **Diferentes clases de calefacción.** — La *calefacción* tiene por objeto utilizar, en la economía doméstica y en la industria, los manantiales de calor que nos ofrece la naturaleza.

Las más comunes hasta hoy son la combustión de la leña, del carbón vegetal, de la hulla, del coke, de la turba y de la antracita. Hace ya años sin embargo que se utilizan también el gas del alumbrado, los aceites de petróleo y aun la electricidad.

Según los aparatos que se emplean en la combustión, pueden distinguirse cinco sistemas de calefacción: 1°. calefacción de fogón descubierto (*chimeneas*) ; 2°. calefacción de fogón interior (*hornillos*) ; 3°. calefacción por el aire caliente (*caloríferos de aire*); 4°. calefacción por el vapor (*caloríferos de vapor*) ; 5°. calefacción por circulación del agua caliente (*caloríferos de agua*).

715. **Chemineas.** — *Descripción.* — Sábese que las chimeneas son fogones descubiertos, dispuestos contra la pared, y coronados por un cañón que sirve para el desprendimiento de los productos de la combustión.

Historia. — Su invento parece datar del primer siglo de la era cristiana. En los tiempos más remotos el fuego se hacia en medio de la habitación y el humo iba

saliendo por un agujero practicado en el techo. Las primeras chimeneas, aunque colocadas contra la pared, no tenían el marco de las actuales, sino tan sólo en su parte superior un conducto por donde se desprendía el humo. En los tiempos modernos fue cuando se las arregló tales como son hoy; su perfeccionamiento se debe á los físicos y principalmente á Filiberto Delorme, Gauger, Franklin, Montgolfier y Rumford.

Ventajas é inconvenientes. — Por muchos perfeccionamientos que se hayan introducido en la construcción de las chimeneas, todavía son el modo de calefacción más imperfecto en el terreno económico, pues no utilizan con la madera más que 6 por 100 del calor total emitido por el combustible, y 13 por 100 con el coke y la hulla; esto se debe á que la corriente de aire necesaria para la combustión arrastra siempre consigo al exterior parte considerable del calor producido. Esta fué la razón de que Franklin dijera que si se quería obtener la *menor cantidad posible de calor* para una cantidad dada de combustible, era preciso adoptar las chimeneas. Sin embargo, son el método de calefacción más agradable y sano, por causa de la presencia del fuego y de la renovación continua del aire en las habitaciones que el *tiro* produce.

716. *Tiro de las chimeneas.* — Se entiende por *tiro* de una chimenea una corriente de abajo arriba que se establece en el tubo por efecto de la subida de los productos de la combustión; cuando la corriente es rápida y continua, se dice que la chimeana *tira* bien.

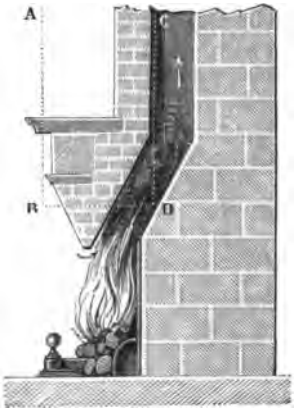


Fig. 655.

El tiro se debe á la diferencia de las temperaturas dentro y fuera del tubo ó cañón. Como los gases que lo llenan son menos densos que el aire del cuarto, resulta imposible el equilibrio. En efecto, el peso de la columna gaseosa CD (fig. 655) del tubo es menor que el de la columna de aire exterior AB, de la misma altura, por lo cual resulta desde fuera hacia dentro de la chimenea un exceso de presión que expulsa los productos de la combustión: este movimiento es tanto más rápido cuanto mayor es la diferencia de peso entre las dos masas gaseosas.

Pruébase fácilmente la existencia de las corrientes que en los gases producen las diferencias de temperatura, por medio del experimento que sigue: Ábrese una puerta que ponga en comunicación una habitación caliente con otra que no lo esté y se lleva á la parte superior de la misma una bujía encendida; entonces se ve que la llama se dirige de la pieza caliente hacia la fría. Por el contrario, si se coloca la bujia en al suelo, la llama se dirige desde la habitación fría

hacia la caliente. Estos efectos se deben á una corriente de aire caliente que sale por lo alto de la puerta, mientras que el aire frío y más denso que va á reemplazarlo llega por debajo.

Condiciones de un buen tiro. — Las condiciones de un buen tiro en una chimenea, son las siguientes.

1°. La sección del tubo ó cañón no debe tener más que la superficie estrictamente necesaria para la salida de los productos de la combustión; de otro modo, si esta sección es demasiado grande, pueden establecerse al mismo tiempo corrientes ascendentes y corrientes descendentes, y la chimenea *da humo.*

Es conveniente añadir en lo alto del cañón un conducto cónico más estrecho que él, á fin de que el humo salga con velocidad suficiente para resistir á la acción del viento.

2°. El tubo de la chimenea debe ser suficientemente elevado; pues el exceso de la presión exterior será tanto mayor cuanto más alta sea la columna de aire caliente.

3°. El aire exterior debe poder penetrar en la habitación con rapidez suficiente para responder al llamamiento del fogón. En un cuarto herméticamente cerrado no podría prolongarse la combustión, ó bien se establecerían corrientes de aire descendentes que harían bajar el humo. Precisa, pues que el aire entre en cantidad bastante por las rendijas de las puertas y ventanas.

4°. Debe evitarse que comuniquen entre sí dos tubos de chimenea; pues si uno tira más que otro, puede producirse una corriente de aire descendente que haga penetrar el humo en el otro cuarto.

717. **Hornillos.** — Los *hornillos* son aparatos de calefacción de fogón aislado, que se colocan en el centro mismo de la masa de aire que se trata de calentar, de modo que el calor irradie en todas direcciones alrededor del hogar. La parte inferior da paso al aire necesario en la combustión, cuyos productos se desprenden en la superior por tubos de fundición más ó menos largos.

Ventajas é inconvenientes. — Como los productos gaseosos no llegan al exterior sino ya muy enfriados, lógrase utilizar casi la totalidad del calor producido; por tal razón resulta más económico este método; pero dista mucho de ser tan salubre como las chimeneas, pues sólo da ventilación muy escasa: puede hasta decirse que es nula cuando el aire se toma fuera de la habitación, según pasa con los hornillos suecos. Además, los hornillos presentan el inconveniente de difundir olor desagradable y emanaciones deletéreas, sobre todo cuando son de hierro colado ó de palastro. Esto se puede atribuir á la descomposición de las materias orgánicas del aire por su contacto con las paredes calientes de los tubos, y también á los gases del fogón, para los cuales se hace permeable el hierro fundido á temperatura elevada.

Hornillos de combustión lenta, género Choubersky, etc. — Estos inconvenientes se han agravado más aún en los hornillos *de combus-*

tión lenta, tan generalizados desde hace algunos años. Cuanto se puede decir de más favorable sobre este método de calefacción, es que el mejor de los tipos no vale nada; — en lo relativo á la higiene por supuesto, — porque desde el punto de vista de la economía del combustible presentan serias ventajas sobre todos los métodos de combustión viva. Este invento moderno ha sido caracterizado no sin motivo diciendo que realiza *el envenenamiento lento de la sangre á domicilio y por poco dinero.*

718. **Calefacción por el vapor.** — La propiedad que tienen los vapores de devolver su calor de vaporización cuando se condensan, se ha utilizado para la calefacción de los baños, de los talleres, edificios públicos, jardines artificiales, estufas, etc. Con tal objeto se produce vapor en calderas análogas á las de las máquinas térmicas, y después se le hace circular por una tubería instalada en el punto que se trata de calentar. El vapor se condensa en estos tubos y les cede todo su calor de vaporización en el momento de la condensación. Este calor se transmite después al aire exterior ó al líquido donde está la tubería.

719. **Calefacción por el aire caliente.** — *Caloríferos de aire.* — La calefacción por el aire caliente consiste en calentar aire en la parte interior de un edificio, y dejarlo subir después hasta los pisos superiores, en virtud de su menor densidad, por una tubería instalada en las paredes.

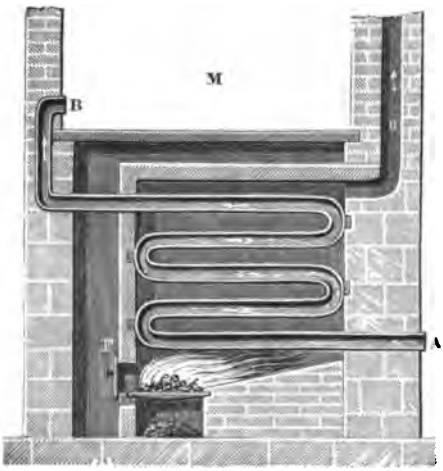


Fig. 656.

Descripción del calorífero. — El aparato está dispuesto según indica la figura 656. Un hornillo F instalado en los sótanos, contiene, unos después de otros, varios sistemas de tubos AB, de los cuales sólo se ve uno en el dibujo. El aire exterior penetra por el orificio A, llamado *presa de aire*; ahí se calienta, y subiendo en el sentido de las flechas, penetra en las habitaciones M por el orificio superior B, que se denomina *boca de calor.* De este modo tiene cada habitación una ó más bocas de calor en los diferentes pisos; se debe instalarlas lo más bajo posible, porque el aire caliente tiende siempre á subir.

El conducto O es un tubo de chimenea ordinario por donde salen al exterior los productos de la combustión del hornillo.

Ventajas é inconvenientes. — Los *caloríferos de aire* son mucho más económicos que las chimeneas; pero como no pueden ventilar tan

bien las habitaciones, hay que colocar en la parte superior de éstas bocas de salida que dejen paso el aire viciado.

720. **Calefacción por circulación de agua caliente.** — *Caloríferos de agua.* — La calefacción por circulación de agua caliente consiste en un movimiento circulatorio continuo de agua que, después de calentarse en una caldera, sube por una serie de tubos, para bajar de nuevo á la caldera por un sistema semejante así que se ha enfriado.

Descripción del calorífero. — El primer aparato propio para este género de calefacción fué inventado por Bonnemain, en Francia, á fines del siglo último. La figura 657 representa una disposición ya antigua, que se debe á M. León Duvoir: es un esquema muy claro de calorífero de agua caliente que puede servir para un edificio de varios pisos.

El aparato de calefacción, instalado en los sótanos, consiste en una caldera *oo*, de forma de campana y de fogón interior F. En la parte superior de la caldera está fijo un largo tubo M, que termina en un depósito Q, situado en los

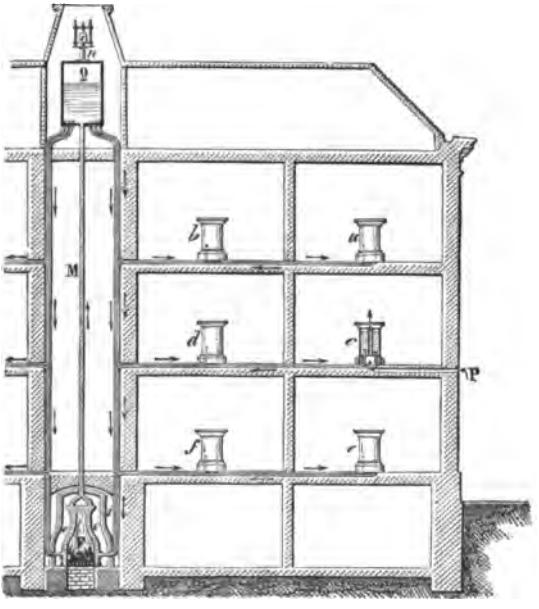


Fig. 657.

desvanes del edificio que se trata de calentar. Este depósito tiene en su parte superior un gollete *n* cerrado por una válvula *s*, que se carga más ó menos, para limitar la tensión del vapor dentro del aparato.

Una vez llenos de agua la caldera y el tubo M, lo mismo que una parte del depósito Q, sucede que, según el agua va calentándose en la caldera, se produce en el tubo M una corriente ascendente de agua caliente hasta el depósito Q, mientras se establecen al mismo tiempo corrientes descendentes de agua menos caliente y más densa, que arrancan de la parte inferior de este depósito, y se

dirigen por otros tantos tubos á recipientes *b* y *a* llenos de agua. De estos recipientes salen á su vez nuevos tubos en que continúa la corriente descendente hasta otros recipientes *d*, *c* y *f*, *e*; por fin, la corriente continúa desde estos últimos por tubos de regreso hasta la parte inferior de la caldera.

En este doble recorrido cede el agua su calor sensible á los tubos y á los recipientes, que se calientan, convirtiéndose en verdaderos hornillos de agua. Calcúlase fácilmente su número y dimensiones para calentar un espacio determinado, fundándose en este dato teórico y empírico al mismo tiempo de que *un litro de agua basta para comunicar una buena temperatura á 3200 litros de aire.* Dos de esos hornillos bastan durante los frios para mantener á 15° de 600 á 700 metros cúbicos de aire.

Los recipientes *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* están atravesados en su eje por tubos de hierro fundido llenos de aire que se toma en lo exterior por tubos P, situados debajo del piso. Este aire se calienta en los tubos y se desprende después por la parte superior de los recipientes, de modo que las habitaciones se calienten y se ventilen al mismo tiempo.

Ventajas é inconvenientes de los caloríferos de agua. — La principal ventaja de este método de calefacción es proporcionar temperatura esencialmente constante, porque la masa de agua contenida en los recipientes y en los tubos no se enfría sino poco á poco; así es que se les usa mucho en los jardines artificiales, en las estufas, para la incubación artificial y, en general, siempre que se requiere temperatura uniforme.

En el terreno práctico tiene este sistema el inconveniente de exigir mucho tiempo para funcionar. La circulación no empieza sino cuando la temperatura del agua llega á alcanzar grado bastante alto. De modo que no hay manera de usarlo en los locales que precisa calentar en poco rato y por poco tiempo, como los teatros, salas de concierto, aulas grandes, etc. El calorífero de agua sería en estas circunstancias mucho más costoso que el de aire.

Aparatos de baja presión y *aparatos de alta presión.* — En el calorífero de Bonnemain que acabamos de describir, la temperatura del agua no pasa nunca de la del agua hirviendo, que apenas alcanza. Es el tipo de los aparatos llamados de *baja presión.*

Se han construido otros caloríferos de agua, según el sistema Perkins, donde el líquido se eleva á temperaturas muy superiores á la del agua hirviendo (hasta 300°). Estos son los aparatos de *alta presión.* Pero este método de calefacción, muy ventajoso por lo que se refiere al rendimiento calorífico, presenta graves inconvenientes: primeramente, puede causar incendios, provocando la combustión de las piezas de madera cercanas á los conductos. Además, si se originan rendijas y grietas en los tubos ó sus empalmes, por causa de la alta tensión del vapor á esas temperaturas elevadas, entonces el vapor que sale puede ocasionar explosiones ó rupturas peligrosas [1].

1. Véanse en Guillemin, *Monde physique*, t. IV, pormenores interesantes sobre los diversos modos de calefacción.

CAPÍTULO XVI

NOCIONES ELEMENTALES DE TERMODINÁMICA.

721. **Calor producido ó absorbido por las acciones mecánicas.** — Si se observan las máquinas y mecanismos en marcha, se observa que se calientan ó se enfrian en algunos de sus puntos, ya haya ó no en ellos un foco de calor. Vamos á presentar algunos ejemplos del caso.

I. *Frotamiento ó roce. — El frotamiento de dos cuerpos uno contra otro produce calor.*

1°. Obsérvase con frecuencia que las ruedas de los coches se incendian por efecto del roce contra sus ejes.

2°. *Experiencia de Davy.* — Davy fundió dos pedazos de hielo frotándolos uno contra otro en una atmósfera cuya temperatura estaba por debajo de cero.

3°. *Experiencia de Rumford.* — Rumford efectuó en 1790 una memorable experiencia, descubriendo que perforando debajo del agua una masa de bronce para obtener 250 g de limaduras, se desarrollaba por frotamiento calor suficiente para elevar 25 kg. de agua desde 0° á 100°, ó sean 2500 calorías.

4°. *Experiencias de Beaumont y Mayer.* — Beaumont y Mayer construyeron en Paris, el año 1855, un aparato donde calentaban en pocas horas 400 litros de agua de 10° á 100° : un cono de palo cubierto de cáñamo frotaba, dando 400 vueltas por minuto, con otro cono de cobre hueco, fijo y sumergido en el agua de una caldera herméticamente cerrada ; las superficies frotadas eran constantemente untadas de aceite.

5°. *Experiencias de Tyndall.* — Tyndall imaginó un pequeño aparato que pone perfectamente de manifiesto el calor desarrollado por frotamiento. Compónese de un tubo de latón, de 10 cm de alto y 2 cm de diámetro, al cual se puede imprimir un movimiento de rotación rápido por medio de un mecanismo muy sencillo (fig. 658). Llénasele de agua tibia y se le cierra con un tapón. Mientras que con

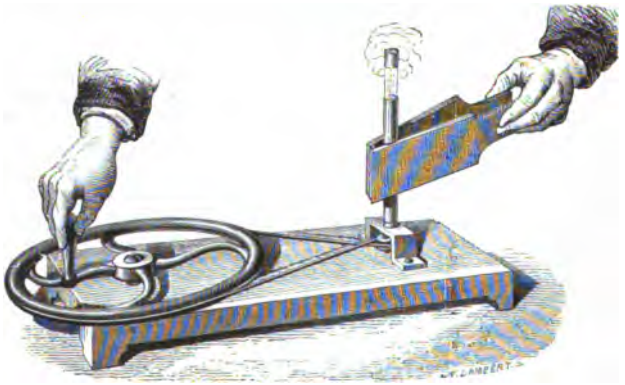


Fig. 658.

una mano se hace girar el sistema, con la otra se comprime el tubo entre dos tabletas de ranuras que forman las hojas de una especie de pinzas planas de madera. Entonces el tubo se calienta muy de prisa por el frotamiento, y cuando la temperatura del agua pasa de 100°, el tapón es lanzado por la tensión del vapor. La experiencia puede efectuarse con éter y exige menos tiempo.

6°. *Eslabón.* — En el eslabón de piedra lo que calienta las partículas metálicas

que de aquél se desprenden hasta el punto de encenderse en el aire es el frote del acero contra el silex.

II. *Compresión y decompresión.* — Cuando se bate sobre el yunque un metal maleable, se le calienta considerablemente. Si se comprime un cuerpo de modo que su densidad aumente, la temperatura se eleva tanto más cuanto mayor es la disminución de volumen. Este fenómeno, poco sensible en los líquidos, lo es más en los sólidos ; en los gases, que son sumamente compresibles, hay un desprendimiento de calor considerable (experiencia del eslabón de aire). Por el contrario, al decomprimirse y expulsar una resistencia, el gas se enfría.

1°. *Experiencias de Tyndall.* — Tómase un vaso de metal de paredes resistentes y provisto de una llave en que se atornilla una bomba de compresión. Si se comprime el aire en el vaso, se observa primeramente que el gas se ha calentado por efecto de este fenómeno. Entonces se le deja enfriar hasta que vuelva á la tem-

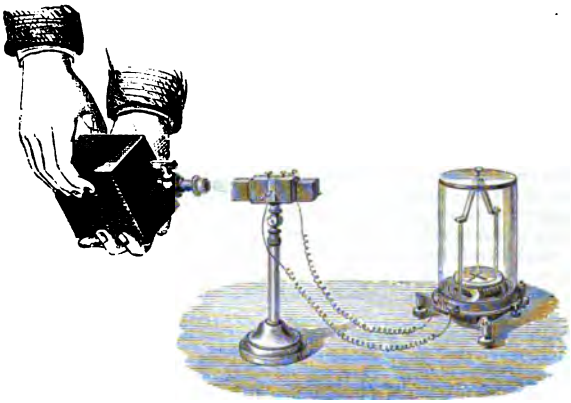


Fig. 659.

peratura ambiente. Cuando se abre después la llave, el aire se lanza violentamente, expulsado por su propia fuerza expansiva, y se observa que al mismo tiempo *se enfría*. Efectivamente, si se recibe el chorro de gas sobre la pila termo eléctrica (fig. 659), el galvanómetro indica, por el sentido de su desviación, un descenso de temperatura.

Por el contrario, si se repite el experimento con un fuelle ordinario, y se recibe también el chorro de gas sobre la pila, la desviación de la aguja del galvanómetro se efectúa en el sentido opuesto, lo cual hace ver que existe elevación de temperatura.

Debe observarse que estos dos fenómenos inversos corresponden á condiciones mecánicas opuestas. Efectivamente, como en la primera experiencia el trabajo mecánico es ejecutado por el aire mismo, en este esfuerzo se consume una porción de su calor, mientras que en el caso del fuelle ejecuta el trabajo la mano del experimentador.

2°. *Experiencia de la marmita de Papin.* — Cuando se abre la válvula de una marmita de Papin que esté muy caliente, de modo que salga un chorro de vapor, éste se enfría tanto por su trabajo de expansión, que no sólo es posible poner en contacto con él la mano sin peligro, sino que se experimenta sensación de frío.

III. *Choque y percusión.* — Dejando caer una bola de marfil sobre un cuerpo duro, rebota en virtud de su elasticidad, pero no se calienta ; pero si la bola es de plomo, que no es elástico y que no rebota, se calienta sensiblemente como si su fuerza viva quedara transformada en calor. Análogamente, cuando se dispara una bala contra una placa de hierro que la detiene bruscamente, el plomo se aplasta y al mismo tiempo se calienta hasta un grado que puede llegar al punto de fusión.

Al ensayar las placas destinadas al blindado de los buques de guerra y disparar contra ellas el cañón, se ve que las balas alcanzan bruscamente la temperatura roja en el momento de ser detenidas por las planchas.

722. **Correlación entre el calor y el trabajo.** — De estos hechos y de estos experimentos resulta que, de manera general, los frotamientos, los choques y todas las resistencias pasivas que parecen consumir perdiéndolo trabajo motor, *engendran calor*. En todos los casos en que hay *destrucción aparente de trabajo* ó de *fuerza viva*, hay *aparición de calor*. Inversamente, toda *creación aparente de trabajo* viene acompañada de una *destrucción de calor*[1].

En dos palabras, el calor es, como la fuerza viva, una forma de la *energía*.

Por consiguiente, es forzoso introducir el calor en las consideraciones dinámicas, con la misma razón que el trabajo y la fuerza viva.

Así se constituye le *Termodinámica;* que tiene por objeto fijar, por medios *completamente experimentales*, las relaciones numéricas que existen entre el calor y el trabajo.

Estas se concentran en dos principios : *el de la equivalencia del calor y del trabajo* y el *principio de Carnot*.

723. **Principio de la equivalencia del calor y del trabajo.** — El hecho de la transformación en calor del trabajo destruído se precisa por otro hecho general : *existe relación numérica entre las cantidades de trabajo destruído y de calor correspondiente*. Esta relación es *independiente de la naturaleza* de los cuerpos y de los fenómenos que sirven de mediadores para operar dicha transformación. Se ha observado en numerosos y variados experimentos que siempre que las sustancias mediadoras no experimentan cambio ninguno molecular y se encuentran al fin del experimento en el mismo estado físico ó químico que al principio, hay *equivalencia absoluta* entre el trabajo destruído y el calor creado ; *á toda cantidad de calor desaparecido corresponde una cantidad determinada de trabajo efectuado*, y recíprocamente, *por todo trabajo consumido aparece cierta cantidad de calor :* este hecho constante es lo que constituye el *principio de la equivalencia del calor y del trabajo*.

724. **Equivalente mecánico de la caloría y equivalente calorífico del kilográmetro.** — Se ha dado el nombre de *equivalente mecánico del calor*, ó mejor dicho, de *equivalente mecánico de la caloría*, al trabajo (calculado en hilográmetros) que corresponde á la desaparición de la unidad de calor. Inversamente, se llama *equivalente calorífico del trabajo*, ó mejor dicho del *kilográmetro*, la cantidad de calor (calculada en colorías) que corresponde á la desaparición de la unidad de trabajo. Estos dos coeficientes son evidentemente inversos uno de otro. La media aritmética de gran número de medidas da como equivalente mecánico 426 kilográmetros.

El equivalente mecánico del calor ha sido determinado al mismo tiempo por métodos directos, cuyo tipo es la experiencia de Joule (1843) y por otros indirectos, análogos al cálculo del Dr. Mayer (1842). Vamos á exponer el principio de ambos métodos.

725. **Determinación del equivalente mecánico del calor : Métodos directos de determinación.** — Recordemos que se sabe medir un trabajo en kilográmetros y una cantidad de calor en calorías. Es pues fácil, valorando por una parte el trabajo gastado en un sistema cualquiera, y por otra el calor que en él se produce (*hallándose el sistema al fin de la experiencia en el mismo estado que al principio*), determinar la cantidad de trabajo necesaria á la creación de una caloría.

I. **Diversas formas de producción y de expresión del trabajo.** — Adóptanse preferentemente las condiciones en que el trabajo utilizado es fácil de apreciar.

1°. Si consiste, por ejemplo, en el descenso de una masa M, que cae de una altura h, tiene por valor Mgh. No obstante, si después de haber recorrido la altura h, la masa posee todavía una velocidad v $\left(\text{y por consiguiente una potencia viva } \frac{Mv^2}{2}\right)$;

1. Esta correlación íntima entre el calor y el trabajo mecánico era completamente inexplicable en la hipótesis del *fluido calórico*, causa de los fenómenos caloríficos. Admitiendo por el contrario la *hipótesis dinámica*, es decir, si se atribuye el calor a un movimiento vibratorio particular de la materia, se convierte en una magnitud de la misma naturaleza que la fuerza viva, y el lazo misterioso que la une con el trabajo mecánico pasa a ser una consecuencia necesaria del principio general de la conservación de la energía.

en el momento de la parada, el trabajo transformado en calor será igual únicamente á $Mgh - \frac{Mv^2}{2}$ (experiencias de Joule).

Tomando como unidades de masa, de longitud y de tiempo el kilogramo, el metro y el segundo, este trabajo se expresa en kilográmetros [1].

2°. Sea cual fuere el modo como se produce el trabajo, puede equilibrársele por un par constante (F — F) aplicado en AB (fig. 660): como la fuerza F permanece siendo tangente al círculo O de radio r, el trabajo de esta fuerza, para una vuelta, es igual á $F \times 2\pi r$; el trabajo de la fuerza — F, que nada distingue de la precedente, es también $F \times 2\pi r$; el trabajo total tiene en consecuencia como valor $2F \times 2\pi r$ ó (designando el brazo de palanca $2r$ por l) $2\pi Fl$.

Si se transforma en calor el trabajo de n vueltas, se tendrá como expresión de este trabajo,

$$W = 2\pi nFl$$

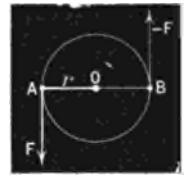


Fig. 660.

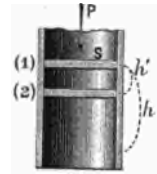


Fig. 661.

3°. Examinemos también el caso en que el trabajo resulta de la variación de volumen de un cuerpo sometido á una presión exterior uniforme, cuyo valor es p por unidad de superficie (fig. 661).

Consideremos un cuerpo cilíndrico cerrado por un émbolo móvil de superficie S, que pasa, por la acción de la presión pS, de la posición (1) á la posición (2). Si la presión permanece constante durante el cambio de posición, se tiene

$$W = pS \times h' = pSh';$$

ahora bien, Sh es la variación de volumen Δv sufrida por el cilindro : luego $W = p\,\Delta v$.

II. *Representación y cálculo del trabajo.* — Puede representarse gráficamente este trabajo por el área de un rectángulo que tiene como dimensiones p y Δv (fig. 662). Como para una variación de volumen consecutiva $\Delta v'$, p adquiere un nuevo valor p', el trabajo correspondiente estará representado por el área del rectángulo próximo de dimensiones p' y $\Delta v'$, y así sucesivamente.

Si p varía de manera continua, los puntos M estarán en una curva y el conjunto de los rectángulos precedentes será reemplazado por un área curvilínea tal como OABC (fig. 663). Construyendo la curva AB, que representa el modo de variación de la presión específica p, en una hoja homogénea, habrá medio de obtener el área, y por consiguiente el trabajo W; bastará con pesar la porción OABC de la hoja y dividir el peso total por el peso de la unidad de superficie.

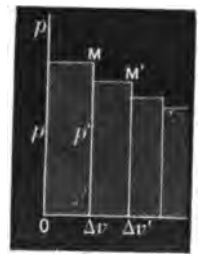


Fig. 662.

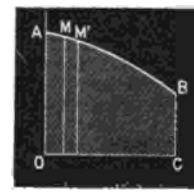


Fig. 663.

III. *Caso de los gases : Transformaciones isotermas y curvas isotermas. — Ciclos cerrados.* — Este método de representación es muy cómodo cuando se trata de los gases. Supongamos que una masa gaseosa esté mantenida á temperatura constante ; sábese (ley de Mariotte) que los estados sucesivos que puede revestir esta masa satisfacen todos á la relación [1] pv = constante.

1. Si se adoptan como unidades el gramo, el centímetro y el segundo, se le expresará en *ergs*.

Para pasar del 2º estado al 3º (fig. 667), basta dejar encima del émbolo que limita este volumen v un espacio vacío Δv y establecer una comunicación de volumen despreciable entre v y Δv. Según una experiencia debida á Gay-Lussac y repetida por Joule, como esta expansión se efectúa sin producción de trabajo exterior, no modifica en nada la temperatura del sistema gaseoso. El paso del estado [1] al estado [2] no difiere del de [1] á [3] sino en que en este último ha habido un trabajo exterior producido igual á $p_0\,\Delta v$.

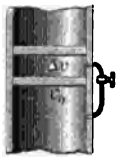


Fig. 667.

La cantidad de calor C se ha gastado, primero en alimentar este trabajo, lo cual exige $\frac{p\,\Delta v}{E}$ calorías, y después en elevar 1º la temperatura del gas, cosa que corresponde, según la observación anterior, al calor c.

De manera que puede escribirse la igualdad

$$C = c + \frac{p\,\Delta v}{E}, \qquad \text{de donde} \qquad C - c = \frac{p\,\Delta v}{E}.$$

Como $\qquad pv = RT, \qquad$ se tiene $\qquad p\,(v + \Delta v) = R\,(T + 1)$:

de donde $\qquad p\,\Delta v = R.$

Luego $\qquad C - c = \frac{R}{E}, \qquad$ y por tanto, haciendo $\frac{C}{c} = \gamma,$

$$\text{[III]} \qquad E = \frac{R}{C - c} = \frac{R}{C\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)},$$

De ahí resulta que se puede calcular el equivalente mecánico de la caloría en función del cociente $\frac{C}{c}$. Conócense R y C (672); sólo falta calcular el cociente $\frac{C}{c}$,

728. **Determinación de $\frac{C}{c}$.** — I. *Estudio de las transformaciones de una masa de gas.* — De los tres factores, fuerza elástica, volumen, temperatura, sólo dos son arbitrarios, pues el tercero es determinado por la igualdad [I] $pv = RT$.

Es pues posible proponerse pasar de un estado inicial ó otro final determinado dando de antemano:

sea	p y v,	de modo que el estado final sea	$p + \Delta p$	$v + \Delta v$,
sea	p y t	— —	$v + \Delta p$	$t + \Delta t$,
sea	v y t	— —	$v + \Delta v$	$t + \Delta t$.

1º. *Caso general.* — Supongamos que se dé cierto aumento á dos de las variables; para la tercera resultará otro definido por la ecuación

$$(p + \Delta p)\,(v + \Delta v) = R\,(T + \Delta T)$$

que, teniendo en cuenta la ecuación fundamental, pasa á ser

$$\text{[IV]} \qquad v\Delta p + p\Delta v = R \times \Delta T.$$

Tal es la relación que existe entre las tres variaciones Δp, Δv, ΔT.

2º. *Casos particulares.* — *v permanece* constante: se tiene

$$\Delta v = 0 \qquad \text{con} \qquad \Delta T' = \frac{v}{R}\,\Delta v. \qquad \text{[IV } bis\text{]}$$

p permanece siendo constante: se tiene

$$\Delta p = 0 \qquad \text{con} \qquad \Delta T'' = \frac{p}{R}\,\Delta v. \qquad \text{[IV } ter\text{]}$$

3º. *Ecuación general de la variación de calor.* — Tomemos ahora p y v como variables independientes; *supongamos* que el paso del estado (p, v) al estado $(p + \Delta p, v + \Delta v)$ (que podemos suponer tan inmediato al primero como queramos) se

efectúe en dos tiempos. Primeramente el volumen se mantiene constante, el gas pasa del estado (p, v) al estado $(p + \Delta p, v)$; y después, conservando en adelante la presión el valor $p + \Delta p$, el volumen varía y adquiere el valor $v + \Delta v$.

En el primer tiempo, se tiene $\Delta v = 0$, y la variación de temperatura de la unidad de masa de gas es determinada por la ecuación [IV bis] y el aumento de calor, dado volumen constante, es $c\Delta T'$, quiere decir, $c \frac{v}{R} \cdot \Delta p$.

En el segundo tiempo, la variación de temperatura es definida por la ecuación [IV *ter*] y el aumento de calor á presión constante es $C\Delta T''$, ó $C \frac{p}{R} \cdot \Delta v$.

En suma, para hacer pasar el gas del estado inicial al final, se ha necesitado suministrar á la unidad de masa la cantidad de calor total

$$[V] \qquad \Delta Q = c \frac{v}{R} \Delta p + C \frac{p}{R} \Delta v.$$

Observación. — *Demostración de la ecuación* [V]. — El paso de un estado M cualquiera al estado próximo N (fig. 668) puede efectuarse por infinidad de transformaciones diferentes, quiere decir que el punto representativo M puede seguir infinidad de pequeños arcos de curva que van de M á N: la cantidad ΔQ *permanece siendo del mismo orden de magnitud*. En efecto, según el principio de la equivalencia, la diferencia entre dos transformaciones tales como MPN y MN es el trabajo exterior correspondiente á la transformación MN, el cual es igual al área del triángulo curvilíneo MPN; esta diferencia es inferior al producto $\Delta p \times \Delta v$, que es evidentemente doble de MPN. Los términos correctivos desaparecen al hacer la suma para una transformación final, por ser infinitamente pequeños respecto de los términos principales.

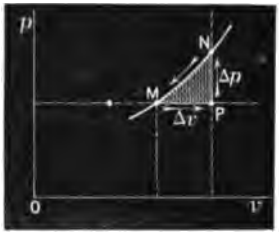


Fig. 668.

La fórmula [V] se aplica por consiguiente á todas los transformaciones.

II. *Caso de una transformación adiabática. — Experiencias de Clement y Desormes.* — Cuando el sistema gaseoso está *térmicamente aislado* del exterior, de modo que no irradie ni reciba calor, se dice que sufre una transformación *adiabática*, En este caso la variación de calor es nula y la igualdad [V] da, haciendo en ella $\Delta Q = 0$,

$$0 = c \frac{v}{R} \Delta p + C \frac{p}{R} \Delta v \qquad \text{ó} \qquad 0 = cv\,\Delta p + Cp\Delta v.$$

Este resultado suministra un medio de determinar $\frac{C}{c}$. Tiénese en efecto

$$[VI] \qquad \frac{C}{c} = -\frac{v\Delta p}{p\Delta v} = -\frac{v}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta p}{p}.$$

Tal es el principio de las experiencias realizadas por Clément y Desormes para calcular γ. Introdúcese en un matraz B de volumen invariable (fig. 669) una masa de gas; la presión es $H - h$ y la temperatura t (H es la presión atmosférica dada por un barómetro en el momento de la experiencia; h es una decompresión previa, medida por la ascensión de una columna de ácido sulfúrico en el tubo recto CT). Si entonces se abre la ancha llave R para cerrarla en seguida, penetra en el recinto B cierta masa del aire exterior, según haría un émbolo, y comprime el gas interior. De ahí resulta que si se considera la *unidad de masa* de este gas, que era primero en el estado

$$[1] \qquad v, \qquad H - h, \qquad t,$$

esta masa se calienta y pasa al estado

$$[2] \qquad v - \Delta v, \qquad H, \qquad t + \Delta t.$$

En efecto, obsérvase, inmediatamente después de cerrada la llave, que la columna de ácido sulfúrico baja hasta hacerse nula.

Después se enfría la masa interior recobrando la temperatura ambiente. Luego,

Fig. 669.

después de enfriamiento, la presión disminuye y el líquido sube de nuevo en el tubo CT hasta la altura h'. El estado final de la unidad de masa del gas es, pues

$$[3] \qquad v - \Delta v, \qquad H - h' \qquad t.$$

Como el paso de [1] á [2] se ha efectuado adiabáticamente por razón de su instantaneidad, puede aplicarse á esta transformación la ecuación [VI] : tiénese pues

$$\frac{C}{c} = \frac{v}{\Delta v}\,\frac{h}{H - h}.$$

La variación de volumen Δv está dada por la comparación de los estados [1] y [3], en los cuales la unidad de masa del gas ha sufrido una variación de volume y de presión á *temperatura constante*. La ley de Mariotte suministra la igualdad

$$v\,(H - h) = (v - \Delta v)\,(H - h'), \qquad \text{ó} \qquad \frac{H - h}{H - h'} = \frac{v - \Delta v}{v} = 1 - \frac{\Delta v}{v};$$

de donde

$$\frac{v}{\Delta v} = \frac{h - h'}{H - h'}$$

y por consiguiente

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{H - h}\,\frac{H - h'}{h - h'}$$

Y, observando que el cociente $\frac{H-h'}{H-h}$ es sensiblemente igual á la unidad, por ser h y h' cantidades muy pequeñas respecto de H, resulta en fin

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{H-h}.$$

De manera que la experiencia consistía sencillamente en medir para cad a cas las alturas h y h'.

Resultados. — Clément y Desormes hallaron, como término medio de sus diversas experiencias, el número 1,354. Su método, continuado por diversos experimentadores, ha suministrado números muy diferentes, que varían desde 1,354 hasta 1,405 (experiencias de Rontgen).

La divergencia es aun mayor si se comparan estos números con los obtenidos por la aplicación de la fórmula de Laplace sobre la velocidad del sonido, pues estos varían entre 1,401 y 1,410.

Idéntica diferencia existe naturalmente entre los dos números que se deducen de la ecuación [3] para el equivalente mecánico del calor. Esto prueba cuanto importa repetir estas medidas por medio de una combinación experimental más precisa. Así lo ha hecho el autor de esta obra, siguiendo método nuevo, cuyos resultados publicará pronto.

729. **Principio de Carnot.** — Tan imposible es, según Sadi-Carnot, obtener un motor térmico[1] en que el calor no pase de una región caliente á otra fría, como poner en acción un *motor hidráulico* sin caída de agua.

En un motor térmico no pasa íntegro al condensador el calor tomado en el foco; en efecto, resulta directamente del *principio de la equivalencia* que á cada cantidad de trabajo producido, igual á 426 kilográmetros, corresponde la destrucción de *una caloría kgdg* (caloría mayor).

Si W es el trabajo suministrado y Q el número de calorías que toma el agente impulsor del émbolo, es claro que el rendimiento R del motor puede expresarse por la igualdad $R = \frac{W}{EQ}$.

Según el principio de Carnot, el rendimiento R no puede ser nunca igual á la unidad; en otros términos, *un motor térmico en marcha lleva siempre á la región fría* (condensador) *una fracción del calor tomado en la región caliente* (caldera).

Es claro que entonces el rendimiento R es por fuerza inferior, ó igual todo lo más, á un número $R' < 1$, que corresponde á un *rendimiento máximo*; Á qué categoría de motores térmicos debe atribuirse este rendimiento máximo R'?

Para contestar á esta pregunta hay que empezar por concebir un motor térmico en que el cuerpo puesto en juego puede recobrar á cada instante el estado anterior infinitamente próximo. Un motor de esta clase se llama *reversible* y podrá absorber el trabajo producido por otro motor cualquiera, tomar calor del foco frío y llevar calor al foco caliente. Está caracterizado por la propiedad siguiente.

Teorema. — *Todos los motores térmicos reversibles, que funcionan entre los dos mismos focos, tienen el mismo rendimiento.*

Sean M y M_1 dos motores reversibles, que funcionan entre los dos mismos focos y en condiciones tales que, tomando al foco caliente las cantidades de calor q y q_1, transporten al foco frío una *misma* cantidad de calor q'.

Los dos motores suministrarán respectivamente los trabajos

$$E(q - q'), \qquad F(q_1 - q').$$

Arreglemos los dos motores de manera que M tenga que funcionar en sentido inverso, bajo la acción de M_1. Si se supone $q_1 > q$, la combinación (M, M_1) suministrará también el trabajo

$$E(q_1 - q') - E(q - q') = E(q_1 - q),$$

y esto sin que haya calor llevado al foco frío, puesto que éste suministra q' calorías á M y recibe q' calorías de M_1.

1. En el § 733 veremos que se llama *motor térmico* á todo aparato por cuyo medio se puede transformar calor en trabajo.

Como esta consecuencia se encuentra en contradicción con el principio de Carnot, no es posible tener $q_1 > q$, quiere decir

$$E(q_1 - q') > E(q - q') \quad \text{ó} \quad R_1 > R,$$

toda vez que

$$R_1 = \frac{E(q_1 - q')}{Eq'}, \qquad R = \frac{E(q - q')}{Eq'};$$

Luego se tiene

$$R_1 \leqslant R.$$

Esta consecuencia es independiente de la naturaleza del motor M_1.

Luego, *un motor, sea cual fuere, no puede dar rendimiento superior al de un motor reversible.*

Si el motor M_1 es reversible, se puede hacerle desempeñar en la demostración precedente el papel de M. Así se llegaría á la conclusión

$$R \leqslant R_1.$$

Las condiciones simultáneas

$$R_1 \leqslant R, \qquad R \leqslant R_1$$

exigen la igualdad

$$R = R_1 = R'.$$

Luego *todos los motores térmicos reversibles tienen el mismo rendimiento máximo* R'.

Observación. — Estos razonamientos suponen que los motores considerados funcionan entre los mismos dos focos, sin lo cual el rendimiento R' no quedaría determinado. Se ve además que la *naturaleza* del agente que se transforma en la máquina no interviene.

Observación. — De la igualdad

$$\frac{E(q_1 - q')}{Eq'} = \frac{E(q - q')}{Eq'}$$

se deduce

$$\frac{q_1}{q'} = \frac{q}{q'}.$$

Al cociente $\frac{q'}{q}$ se le ha dado el nombre de *coeficiente de pérdida* de la máquina.

De manera que el teorema precedente puede enunciarse también así : *las máquinas reversibles, que funcionan entre los dos mismos focos, tienen el mismo coeficiente de pérdida.*

730. **Ciclo de Carnot.** — Llámase *ciclo de Carnot* á un cuadrilátero curvilíneo (fig. 670) dos de cuyos lados opuestos son arcos de isotermas y los otros dos arcos de adiabáticas.

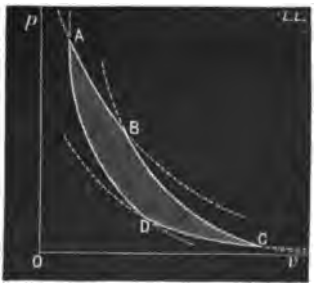


Fig. 670.

Una máquina cuyo agente sufre transformaciones representadas por un ciclo de Carnot es reversible. En efecto, el agente (por ejemplo el vapor) está siempre en contacto con cuerpos cuya temperatura difiere infinitamente poco de la suya y las variaciones de volumen pueden efectuarse gradualmente, de manera que la presión exterior ejercida por el émbolo permanezca siendo infinitamente próxima á la del vapor.

De modo que la máquina se encuentra en condiciones infinitamente próximas á las de su equilibrio, lo cual hace posible á cada instante su marcha, en un sentido ó en otro.

731. **Temperaturas absolutas.** — He aquí cómo se ha servido G. Lippmann del principio de Carnot para definir las *temperaturas absolutas*, esto es, independientes del agente termométrico

Consideremos los cuerpos

$$A, \quad A', \quad A'', \quad A''',\ldots,$$

en fusión ó en ebullición. Constituyen una serie de temperaturas físicas perfectamente determinadas.

Asociemos sucesivamente á la isoterma A las isotermas A', A'', A''',... ; sean $q, q', q'', q''',\ldots$, las cantidades de calor puestas en juego por una máquina reversible que funciona entre (A y A'), (A y A''),.... Las cantidades de calor

$$[1] \qquad q, \quad q', \quad q'', \quad q''',\ldots,$$

son las que M. Lippmann considera como medida de las temperaturas de los focos

$$A, \quad A', \quad A'', \quad A''',\ldots \quad \text{etc.}$$

Es claro que para fijar la escala se necesita tomar arbitrariamente por ejemplo q : entonces q' estará dado por el coeficiente de pérdida

$$\frac{q'}{q}$$

del motor reversible que funciona entre A y A'.

Se puede demostrar, — por un razonamiento análogo al que ha servido para probar el anterior teorema, — que la serie [1] es única, ó en otros términos, que el coeficiente de pérdida de un motor reversible que funciona entre los focos A'' y A''', pongamos por ejemplo, tiene como valor

$$\frac{q'''}{q''}.$$

Observaciones. — Cuando se emplean las cantidades de calor $q, q', q'',\ldots$, para medir las temperaturas absolutas, se las representa por las letras T, T', T'',... De donde se deduce que el rendimiento puede escribirse

$$R = \frac{T - T'}{T}.$$

Demuéstrase que si t representa la temperatura del foco ó manantial calorífico, dada por el termómetro normal, la temperatura absoluta T resulta de la expresión

$$T = \frac{1}{\alpha} + t \qquad \left(\alpha = \frac{1}{273}\right),$$

definiendo por el número 100 la temperatura normal del vapor de agua en ebullición

732. **Trabajo muscular y Calor animal.** — *Experiencias de Hirn.* — Mayer fué quien primero tuvo la idea de comparar el animal á una especie de máquina térmica, en que el calor, debido á la respiración, se transforma parcialmente en trabajo muscular. Hirn ha confirmado esta hipótesis experimentalmente.

Puso á un hombre en una garita cerrada, y observó los efectos caloríficos y químicos de su respiración, primero cuando se encontraba en reposo y después cuando trabajaba en elevar su propio peso sobre la circunferencia de una rueda móvil. Dos tubos de caucho llegaban á la boca del sujeto, uno que le llevaba desde un gasómetro aforado el aire necesario para la respiración, y el otro que conducía el aire espirado á otro gasómetro también aforado : esto permitía medir el oxígeno consumido y el ácido carbónico producido. La temperatura del aire en la garita se elevaba progresivamente y llegaba á ser constante cuando el calor perdido por radiación llegaba á ser igual al que se producía en el organismo. Después se reemplazaba el hombre vivo por la llama de un mechero de gas, que se arreglaba de manera á propósito para obtener que el aire de la garita se elevase á la misma temperatura constante. Del volumen del gas quemado se deducía la cantidad de calor producida por el mechero de gas, y en consecuencia la cantidad emitida por el hombre en un tiempo dado.

En estado de reposo, éste consumía 30 gramos de oxígeno por hora y por 150 calorías producidas : cuando subía en la rueda, consumía 130 gramos de oxígeno, y el número de calorías correspondientes, que hubiera debido ser de 750, sólo era de 250. Luego 500 calorías eran consumidas : 1°. por el trabajo muscular interno ; 2°. por el trabajo externo necesario para elevar el peso del hombre.

Obsérvase el efecto inverso cuando un hombre recibe trabajo en vez de producirlo, si baja en vez de subir : á 30 gramos de oxígeno absorbido corresponde un desprendimiento superior á 150 calorías, debiéndose el exceso de calor al trabajo exterior de la gravedad durante el descenso.

CAPÍTULO XVII

MÁQUINAS TÉRMICAS[1].

733. **Definiciones.** — Se llama *máquina térmica, máquina de fuego* ó *motor térmico* á todo aparato que produce trabajo consumiendo calor. Esta transformación se opera por medio del vapor de agua ó de un gas cualquiera, conforme á los principios de la termodinámica.

La *máquina de vapor* es el tipo de estos aparatos ; ahí el gas mediador es el vapor de agua. Cierto peso de este líquido, tomado á temperatura inicial t, es puesta en contacto con un manantial de calor (caldera); allí se transforma en vapor, á una temperatura t' muy superior á t : después penetra en un cilindro donde *trabaja* dilatándose sobre un émbolo ; desde allí pasa á un frigorífico ó *condensador*, donde recobra su temperatura inicial t volviendo al estado líquido ; por fin vuelve á la caldera después de recorrer una serie de transformaciones periódicas que constituyen un *ciclo cerrado* (725, III).

Las máquinas de vapor son los motores más generalizados. Sus tipos son en extremo numerosos, pero se puede agruparlos en tres grandes categorías : *máquinas fijas, máquinas marinas* y *locomotoras* ; las describiremos con pormenores. Después indicaremos los principales tipos de *máquinas de aire caliente* y de *máquinas* ó *motores de gas*.

Toda máquina de vapor se compone de dos partes perfectamente distintas : aquella en que se produce el vapor y la otra donde se le utiliza. La primera es el *generador de vapor* ó *caldera*, la segunda constituye la máquina propiamente dicha.

734. **Generadores de vapor.** — Todo generador de vapor consiste en un recipiente metálico herméticamente cerrado y lleno en gran parte de agua ; está expuesto al calor de un fogón que reduce el agua á vapor.

Para producir las grandes cantidades de vapor necesarias al funcionamiento de las máquinas, los generadores deben tener grandes

1. Este capítulo ha sido redactado en colaboración con M. P. Létang, joven ingeniero de mucho mérito que prematura muerte ha arrebatado á su familia y amigos durante la impresión de esta obra.

dimensiones y presentar superficies considerables al contacto de los gases calientes del fogón. Se les monta en una construcción de metal ó de mampostería que concentra sobre ellos las llamas de un intenso fogón.

Consideraremos sucesivamente la *caldera de hervideros*, que es el modelo clásico, la *caldera semi-tubular*, la *caldera tubular*, la *caldera de vaporización instantánea* y la *caldera locomóvil*.

735. **Caldera de hervideros.** — Es un generador de *máquina fija*. Consiste en un largo cilindro de palastro PQ cerrado en sus dos extremos por dos casquetes esféricos.

Debajo se encuentran dos cilindros BB, de diámetro más pequeño, también de palastro, y que comunican con el generador, cada uno por dos golletes. Estos cilindros se denominan *hervideros*. Se destinan á recibir directamente el fuego y están llenos de agua por completo, mientras que el cilindro PQ lo está únicamente un poco más de la mitad.

Debajo de los hervideros se encuentra el fogón, donde arde carbón de piedra ó de coke. Á fin de multiplicar la superficie de calefacción y utilizar todo el calor arrastrado por los productos de la combustión, se hace que éstos circulen por conductos de ladrillos que rodean las paredes de los hervideros y del generador. Estos conductos envolventes dividen el hornillo en dos partes horizontales FF y CD (fig. 671). Además, el compartimiento superior se divide en tres regiones distintas DD y C, mediante dos tabiques verticales que no se ven en el dibujo y que corresponden por ambas partes á los hervideros.

La llama y los productos de la combustión pasan primero lamiendo la parte inferior de los hervideros, de delante hacia atrás y vuelven en sentido contrario por el conducto central; después se dividen y se dirigen al fin por los conductos laterales DD al tubo K de la chimenea, por donde van á perderse en la atmósfera.

736. **Calderas semi-tubulares.** — Á fin de disminuir el volumen excesivo de las calderas, aunque conservándoles las mismas superficies de contacto con los gases calientes, se ha reducido la longitud de los hervideros B, B y del cuerpo de caldera T, G (fig. 673 y 674), pero en este último se ha colocado cierto número de tubos que los gases calientes tienen que atravesar en el sentido de las flechas. La caldera *semi-tubular* está provista de un nivel de agua M, que indica á cada instante el nivel del líquido en su interior.

737. **Calderas tubulares.** — Para ir más lejos todavía en la reducción de las dimensiones exteriores y aumentar por el contrario la superficie de calefacción, se han construido calderas compuestas *únicamente de tubos* en torno de los cuales circulan las llamas del fogón (fig. 675).

El agua impulsada, sea por la bomba de alimentación, sea por el inyector R (742, 2°), va por el tubo K á un depósito y desde allí á un colector D, de acero fundido, dividido en dos compartimientos separados por un tabique. La circulación del agua debida á la ebullición hace que el líquido menos caliente baje poco á poco al compartimiento E y corriendo por el tubo central P, llegue á su extremo en el tubo envolvente V, donde queda en contacto con el fuego. Esta agua, caliente y mezclada de vapor, sube por el tubo exterior V, y luego pasa al compartimiento J del colector hasta el depósito R donde el vapor se desprende. En las dos extremidades de los tubos hay unos tapones U, U', de fundición de hierro, unidos por tirantes de hierro que atraviesan los tubos en toda su longi-

tud y efectúan cerradura hermética. El vapor al salir del depósito R, atraviesa los tubos G, llamados *sobrecalentadores* de vapor. Estos tubos forman un ser-

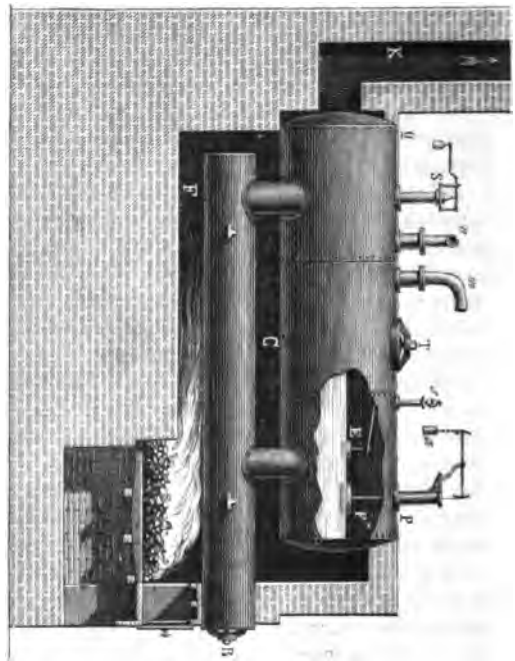


Fig. 671. — Caldera de hervideros.

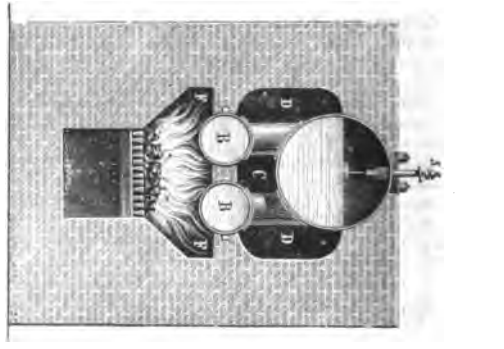


Fig. 672. — *Idem.* (Sección transversal).

Explicación. — E. *Flotador* del silbato de alarma. — F' *Flotador* destinado á indicar el nivel del agua en la caldera. Mientras el agua llega á la altura requerida, la palanca que lleva el flotador es sostenida por el empuje del agua y por el *contrapeso a*; pero se inclina hacia F' cuando no hay bastante agua y en sentido contrario si hay demasiada. En ambos casos queda avisado el maquinista. S. *Válvula de seguridad*, ya descrita con motivo de la marmita de Papin. T. *Agujero de hombre*, que se abre para las limpias y composiciones del generador. Es de cerradura *autoclava*, quiere decir que se cierra por sí mismo con ayuda de una tapadera aplicada anteriormente y de abajo arriba contra los bordes de la pared por un tornillo de presión: mientras más elevada es la tensión del vapor, más apretada se encuentra la tapa contra la pared, y más hermética es la cerradura. — *m. Tubo* que lleva el vapor á la máquina. — *n. Tubo abductor* del agua de alimentación. — *s. Silbato de alarma.* Funciona en seguida que el nivel baja más allá del punto conveniente: entonces desciende un pequeño flotador E, que cierra el pie del silbato y deja escapar el vapor que va á rozar los bordes de un disco metálico delgado: éste entra en vibración y emite un sonido muy agudo que *avisa* al fogonero ó maquinista.

pentin aplanado donde el vapor abandona, antes de dirigirse á la máquina, las gotas de agua que la vaporización ha arrastrado á circular en torno de los tubos sobrecalentadores.

Se observará que dada una misma superficie de calefacción, este tipo de cal

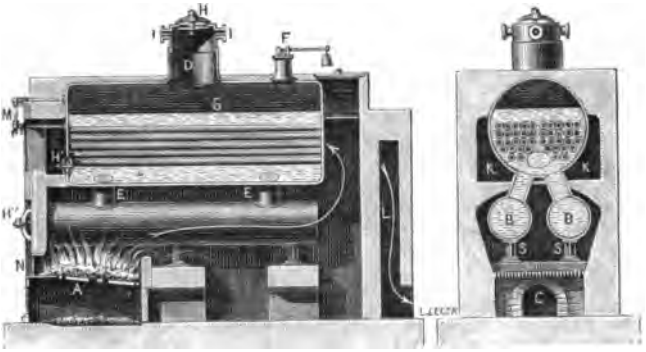


Fig. 673. Caldera semi-tubular. Fig. 674.

dera contiene mucha menos agua que las calderas de hervideros ó semi-tubulares

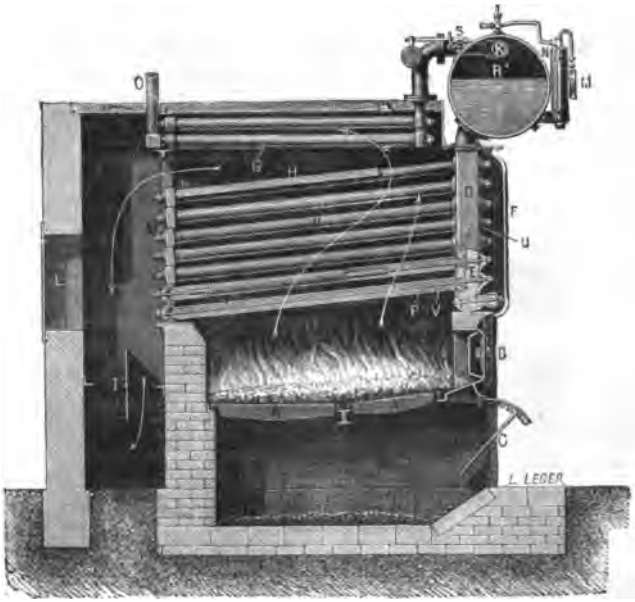


Fig. 675. — Caldera multitubular Collet.

Pormenores. — I, moderador de palastro que sirve para regular el tiro; K, tubo abductor del agua de alimentación de la caldera; L. abertura para limpiar la chimenea; M, manómetro metálico que indica la tensión del vapor; N, nivel de agua; O, tubo que lleva el vapor á la máquina; R, depósito de vapor y de agua; S, válvula de seguridad.

la ruptura de un tubo y la expansión brusca del vapor son pues mucho menos temibles que la ruptura de una placa en los dos primeros sistemas. Por otra parte-

con estos generadores se puede funcionar á presiones muy superiores á las de los otros, porque los tubos que pueden resistir á las altas presiones tienen grueso relativamente escaso, comparados con el de las placas de las calderas de hervideros de análoga resistencia.

738. **Calderas** llamadas **de generación instantánea.** — Llevando más lejos todavía la realización de esta idea, M. Serpollet logró construir generadores compuestos de un simple tubo de paredes muy gruesas y aplanado sobre sí mismo.

En estas condiciones, aunque la longitud del tubo sea bastante grande, la capacidad de la caldera es casi nula, mientras que la superficie de calefacción es considerable. De ahí resulta que el agua que en ella se introduce se vaporiza *instantáneamente* y que precisa renovarla sin descanso, á medida que el vapor es utilizado en la máquina.

Tienen estos generadores la ventaja de permitir la producción del vapor á alta presión y por otra parte su explosión sería enteramente inofensiva, por ser insignificante la cantidad de vapor que contienen.

739. **Calderas locomóviles.** — Las exigencias de la tracción necesitan para las *máquinas locomóviles* y *locomotoras,* calderas de poco volumen relativo y de gran potencia de vaporización. Así es que se ha creado para ellas una forma de caldera especial. El fogón se coloca en medio de una caja de palastro de dobles paredes, entre las cuales se encuentra el agua que se trata de vaporizar.

Antes de dirigirse á la chimenea, los gases calientes y la llama deben recorrer tubos que también están rodeados de agua por todas partes. De manera que la superficie de calefacción es considerable, no obstante las reducidas dimensiones de todo el sistema.

740. **Máquinas de vapor propiamente dichas.** — Los primeros tipos de máquinas de vapor verdaderamente industriales se deben al ingeniero inglés Watt. Sus predecesores, Papin, Newcomen y Jouffroy no habían construído sino modelos rudimentarios, en que las distintas comunicaciones del vapor entre la caldera y el cilindro de la máquina se obtenían por medio de llaves que generalmente se manejaban á mano. El invento capital de Watt fué la *caja de distribución,* que sirve para hacer actuar alternativamente al vapor por debajo y por encima del émbolo y al mismo tiempo para hacer salir en el momento oportuno el vapor ya sin fuerza que acaba de trabajar.

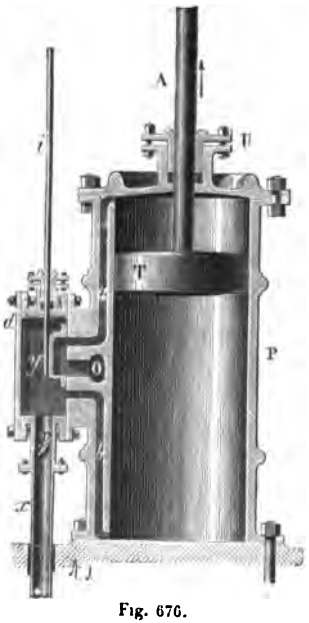


Fig. 676.

1°. *Caja de distribución de vapor.* — El vapor llega del generador por el tubo x (fig. 676), y se dirige á una caja de hierro d, donde se efectúa la *distribución.* Desde esa caja salen dos conductos a y b, practicados en el grueso mismo de las paredes del cilindro, que pueden llevar el vapor, uno hasta la parte superior de émbolo y otro hasta la inferior. Una pieza móvil y, que se denomina

distribuidor con motivo de sus funciones ó *cajón* por su forma, cierra siempre uno de estos conductos, gracias al movimiento alterno de abajo arriba de su vástago *i*. Mientras el vapor está llegando *á la parte inferior* del cuerpo de bomba (fig. 676), la superior de éste se encuentra en comunicación por el conducto *a* con una cavidad *o* de donde arranca un tubo (no representado en la figura), por donde se desprende el vapor que acaba de ejercer acción sobre el émbolo. Después, cuando el vapor llega á la parte superior del émbolo, la que comunica á su vez por el conducto *b* con la cavidad *o* es la parte inferior del cuerpo de bomba. De manera que los conductos *a* y *b* sirven alternativamente para la llegada y la salida del vapor.

2°. *Salida libre* y *condensador*. — En las máquinas llamadas *de salida libre*, el vapor se pierde en el aire por el tubo que comunica con la cavidad *o*, después de haber trabajado sobre el émbolo.

En las máquinas *de condensador*, el vapor dilatado se dirige á un aparato llamado *condensador*. Este aparato no es más que un recipiente H (fig. 677) donde se proyecta á manera de lluvia un chorro de agua fría en sentido contrario al de la llegada del vapor. Éste se condensa allí produciendo un vacío más ó menos completo.

Si comparamos dos máquinas alimentadas por vapor á una misma presión, pero que funcionan, una por salida libre y otra por condensación, el valor de la presión efectiva por unidad de superficie de cada uno de los émbolos no será el mismo. Por ejemplo, si es de 3 atmósferas en valor absoluto, la presión utilizable sobre el émbolo de la máquina de salida libre será de 2 atmósferas únicamente, toda vez que la otra cara se encuentra sometida á la presión atmosférica. Por el contrario, en la máquina de condensación, la presión sería de 3 atmósferas si en el condensador reinara vacío absoluto. En la práctica no ocurre así; sin embargo, el beneficio de presión obtenido es por lo menos de 4/5 de atmósfera.

741. **Mecanismo de la máquina de balancín.** — Los órganos de transmisión del movimiento, que constituyen el mecanismo propiamente dicho, son singularmente sencillos en la primera máquina de Watt, llamada máquina de balancín (fig. 677). El émbolo J, que es movido por el vapor en el cilindro, actúa por su vástago K, cuya cabeza está enlazada con una palanca BC, en la extremidad C de una larga pieza de hierro CC′ móvil, como una palanca del primer género, en torno de un eje horizontal que pasa por su centro y llamado *balancín*. En la otra extremidad C′ de este balancín se encuentra articulada una pieza de hierro C′M, llamada *biela de transmisión*, que puede girar alrededor de un eje horizontal situado en C′ sobre el balancín. Esta biela transmite el movimiento al botón de la manivela M fija en el eje general de la máquina ó *árbol de asiento*, de manera que el movimiento alterno del émbolo se transforme en movimiento continuo de rotación.

El volante V, fijo en el árbol de asiento, tiene por objeto suprimir

el efecto de los *puntos muertos*. Cuando el émbolo llega al final de su carrera en el cilindro, el botón de la manivela M se encuentra, sea en lo más alto, sea en lo más bajo de su camino. En estas dos posiciones, llamadas los *puntos muertos*, el esfuerzo de la biela CC' quedaría completamente anulado por la reacción normal de la plataforma en que gira el árbol de la máquina. Y además, si entonces no se dis-

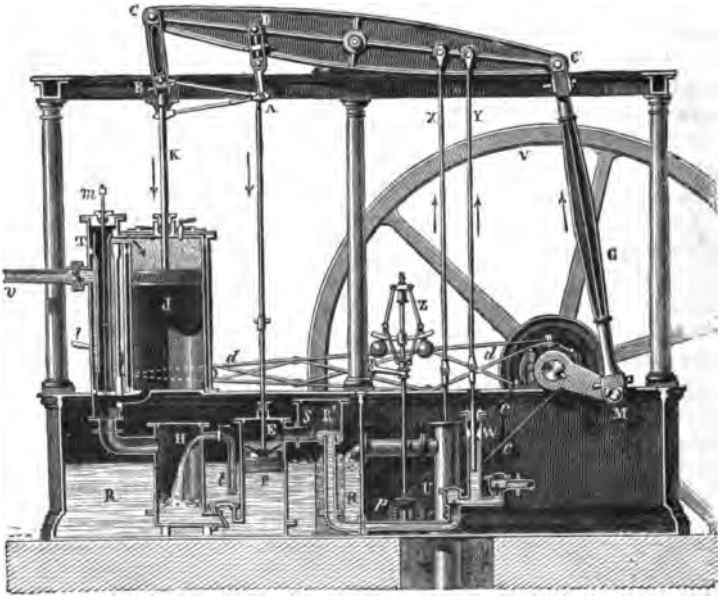


Fig. 677. — Máquina de balancín de Watt.

v. tubo de presa del vapor; T, caja de distribución; J, émbolo; H, condensador; PE, bomba de agotamiento; WY, bomba de alimentación do la caldera; UX, bomba de alimentación del depósito R; *p*Z, regulador de fuerza centrífuga; *ddl*, excéntrica; ABCD paralelógramo articulado; GM, biela y manivela; V, volante.

pusiera de cierta cantidad de energía, precedentemente reservada, el movimiento de la caja de distribución, que es necesario á la inversión de la acción del vapor, no se produciría deteniéndose el movimiento. El volante evita este inconveniente, devolviendo en el instante á los *puntos muertos* una parte de la energía por él acumulada, en su enorme masa, durante el período de actividad del émbolo.

Excéntrica. — Esta restitución se opera por medio de un órgano *dd* llamado excéntrica (fig. 677). Compónese de una plataforma circular *e* (fig. 678) en cuyo contorno se practica una garganta. En esta garganta va á situarse un collar que rodea por completo la plataforma circular y que puede correr libremente sobre él. Está fijo á vástagos de metal T, que van á articularse en *a* en una de las extremidades

de una palanca acodillada *abc*, móvil, en torno del eje *b*. Según la amplitud del movimiento que se desea obtener, se fija la plataforma en el árbol de asiento, alejando más ó menos su centro de figura del centro del árbol. Uniendo entonces un vástago con el collar de la excéntrica, se obtiene por cada vuelta del árbol un camino del vástago igual á dos veces la distancia que separa el centro de la

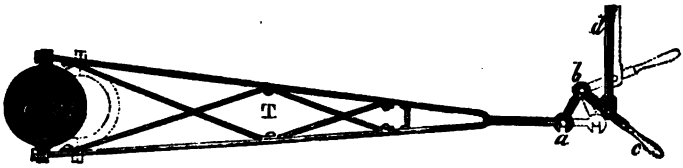


Fig. 678.

excéntrica del centro del árbol. La palanca acodillada *abc* oscila por tanto entre dos posiciones extremas [1]. Al brazo C está fijo el vástago que gobierna la caja de distribución. La posición de la excéntrica en el árbol se determina de manera que la caja de distribución empiece su movimiento un poco antes de que el émbolo llegue al final de su recorrido.

Paralelógramo articulado de Watt. — Compréndese que no es posible unir directamente la cabeza del vástago del émbolo con la extremidad del balancín. En efecto, este último punto describe una porción de circunferencia cuyo centro está en el eje de los topes del balancín, mientras que el vástago A debe moverse siguiendo una recta en la prolongación de su eje. Watt inventó un mecanismo muy ingenioso, el *paralelógramo articulado*, para efectuar este enlace sin torsión ni flexión de los órganos. Está representado en ABCD (fig. 677) y en CEDBO (fig. 679).

La cabeza del émbolo se une en B (fig. 679) con el vértice de un paralelógramo CBDE, cuyos cuatro lados rígidos é invariables, están

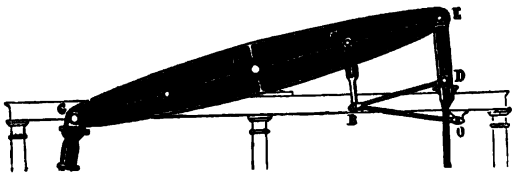


Fig. 679.

articulados en sus vértices, de tal modo que los ángulos varían por efecto del movimiento que imprimen las oscilaciones del balancín, Además, el vértice B está unido, por medio de un vástago BO, con

1. Están representadas en la figura 678. una con líneas continuas y la otra por líneas de puntos.

un punto fijo O de la armadura de la máquina. Las longitudes relativas de estas diversas piezas están calculadas de manera que el vértice D describe poco más ó menos una *línea recta vertical*, mientras que los puntos C, E y B trazan arcos de círculo que tienen como centros O y *o* [1].

Compréndese que este sistema de enlaces es doble en el sentido del grueso á cada lado del balancín. Así es que en realidad el vástago del émbolo está articulado con un eje horizontal que enlaza los dos puntos D.

Condensador y bomba de aire. — La máquina de Watt era de condensación: en O se ve el condensador, y en M la bomba de aire encargada de expulsar de aquél el aire que se desprende del agua sometida á la decompresión del vacío.

742. **Órganos accesorios de las máquinas de vapor.** — 1°. *Bombas de alimentación.* — Es necesario alimentar la caldera á medida que el agua se evapora. Este trabajo lo efectúa la máquina misma poniendo en acción una bomba aspirante é impelente: en la máquina de Watt el vástago G de su émbolo (fig. 676) recibía su movimiento de una biela enlazada directamente con el balancín ; en las nuevas máquinas está unida con una excéntrica, ó con un botón de manivela enlazado con el árbol.

2°. *Inyector Giffard.* — Generalmente la bomba de alimentación es

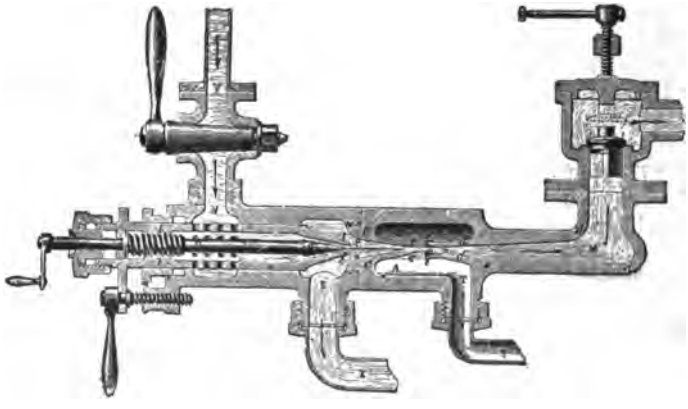


Fig. 680.

reemplazada por el inyector que inventó Giffard. La parte esencial del mismo es un par de conos divergentes *cc* y *ee* (fig. 680) que cons-

1. El punto medio del lado BC tiene la misma propiedad que el punto D ; así es que se le utiliza en las máquinas de Woolff (746,4°) donde los émbolos de los dos cilindros deben moverse al mismo tiempo. Watt no dió sino una solución empírica de este problema ; el matemático francés Peaucellier fué quien demostró rigurosamente que *un sistema articulado de cinco vástagos basta para transformar en rectilíneo el movimiento circular.*

tituyen una especie de trompa de vapor de agua, análoga á las de agua ó de mercurio.

El vapor de agua viene de la caldera por el tubo VV, á alta presión, y como está obligado á salir por el pequeñísimo orificio *tt*, adquiere al hacerlo gran velocidad. Á su salida tropieza con el agua que procede del depósito de alimentación por el tubo EE, la impulsa delante de sí á la vez que se condensa en ella y produce de este modo una aspiración *continua* que hace subir el líquido por el tubo E y mantiene siempre llena la caja de agua *cc*. Al mismo tiempo, el agua que ha recibido el impulso del chorro de vapor, mezclada con la que resulta de la condensación del chorro, penetra en el tubo divergente *dd*, sigue por él perdiendo poco á poco su velocidad inicial, y llega al tubo de alimentación M que la conduce á la caldera.

3°. *Regulador de fuerza centrífuga.* — El movimiento de las máquinas de vapor tiende incesantemente á acelerarse ó retardar, sea porque la tensión del vapor varía en el generador, sea porque el trabajo exigido á la máquina es más ó menos considerable. Para mantener constante la velocidad, se emplea en general un *regulador de fuerza centrífuga* Zp (fig. 677). Éste tiene por efecto, sea como en el sistema de Watt, hacer variar la presión del vapor antes de su entrada en el cilindro, sea como en las máquinas actuales (por ejemplo en las de distribuciones de pestillo), aumentar ó disminuir el volumen de vapor recibido en el cilindro á cada golpe de émbolo.

En un árbol vertical HDO (fig. 681), que gira con velocidad proporcional á la de la máquina, se articulan dos brazos OA, OA′ terminados por su parte inferior en unas bolas metálicas BB. El movimiento del árbol de asiento se comunica á este eje por medio de una correa sin fin que se arrolla en una polea P, fija en el vástago O. En estado de reposo y bajo la influencia de la gravedad, las bolas tienden á colocar en la vertical los dos brazos á que están fijas, mientras que apenas entra en rotación el árbol vertical, aquéllas tienden á separarse de él, por un efecto de la fuerza centrífuga, y á tomar una posición de equilibrio dependiente de la velocidad.

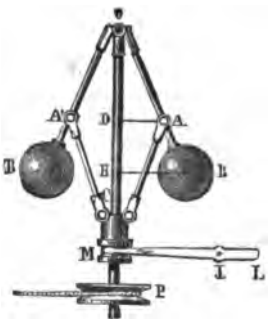


Fig. 681

Para utilizar este esfuerzo se reunen, con bielas articuladas en A′ y A, los dos brazos que sostienen las bolas con un cubo CM que correrá á lo largo del árbol vertical, según tiendan las bolas á separarse más ó menos de él. Este movimiento del cubo se utiliza, por medio de vástagos y palancas apropiadas, sea para poner en acción un tapón que detiene la llegada del vapor y actúa á manera de llave, como en la má-

quina de Watt, sea para mover las teclas de la *distribución de pestillo*, en las máquinas perfeccionadas.

743. **Rendimiento de las máquinas de vapor.** — Es posible calcular el rendimiento de una máquina de vapor independientemente de su sistema.

1°. *Rendimiento teórico.* — Consideremos, por ejemplo, una máquina de condensación en que el vapor trabaja á 5 atmósferas y en que el condensador es mantenido á 40°. El vapor sale, pues, de la caldera á la temperatura de 152°, se dilata en el cilindro, donde pierde calor produciendo trabajo y después se dirige al condensador, donde vuelve al estado de agua á 40°; luego empieza otra vez indefinidamente el ciclo. Aplicando el principio de Carnot (729), se tiene

$$R = \frac{T' - T}{T'} = \frac{273 + 152 - (273 + 40)}{273 + 152} = \frac{112}{425} \ldots = \frac{1}{4} \text{ próximamente.}$$

2°. *Rendimiento práctico.* — Por pequeño que este rendimiento teórico sea, constituye sin embargo un máximum á que nunca se llega en la práctica. — Es posible convencerse de ello calculando directamente la cantidad de calor emitida por el combustible gastado y comparándola con el trabajo desarrollado por la máquina. 1 kg de hulla emite al arder 8000 calorías y 1 cal. equivale á 425 kgm; luego 1 kg de hulla debería producir por su combustión

$$8000 \times 425 = 3\,400\,000 \text{ kgm.}$$

Pero 1 caballo-vapor equivale á 75 kgm *por segundo*, ó sea

$$\text{á } 75 \times 60 \times 60 = 270\,000 \text{ kgm } \textit{por hora.}$$

Luego, para producir el trabajo de un caballo-vapor durante una hora, hay que quemar una cantidad de carbón igual á

$$\frac{270\,000}{8\,400\,800} = 0{,}080 \text{ kg.}$$

Pues bien, las buenas máquinas de vapor consumen por término medio 1 kg de carbón por hora para producir un caballo-vapor. Algunas de muchísima potencia funcionan en condiciones excepcionales y no consumen sino 0,800 kg. De manera que esto constituye un *rendimiento práctico* que varía entre 8 y 9 por 100, mientras que el teórico era de 25 por 100.

744. **Expansión del vapor. — Máquinas de simple expansión: Sistema Clapeyron.** — Hasta ahora hemos supuesto que el vapor de la caldera trabajaba *á plena presión*, quiere decir que afluía, con la presión que tiene en la caldera, sobre cada cara del émbolo durante todo el recorrido. En las primera máquinas de Watt, el vapor trabajaba á plena presión; pero ya este mismo físico tuvo la idea de hacerlo trabajar *con expansión:* el vapor introducido en el cilindro durante una porción no más de la duración del recorrido actúa primero á plena presión; pero á medida que el émbolo adelanta, el vapor se *dilata* aumentando de volumen y su presión diminuye hasta el fin de su camino. De este modo de acción resulta, primero mayor regularidad en el movimiento y luego, dada igualdad de trabajo, una notable economía de vapor y por consiguiente de combustible. Las máquinas que tienen un sistema de expansión se llaman *máquinas de simple expansión.*

Sistema Clapeyron. — Entre los numerosos sistemas de expansión que se han imaginado, citaremos como ejemplo el sistema de Clapeyron, que se usa mucho,

sobre todo en las máquinas de movimiento rápido, tales como las locomotoras. La modificación se refiere á la caja de distribución, ó mejor á las bandas que cubren cada agujero : se les da una anchura superior al diámetro del conducto correspondiente. Los bordes *ab*, *a' b'*, *cd*, *c' d'* (fig. 682), exteriores é interiores, forman lo que se llama *revestimiento* de la caja ; la misión de estas protuberancias es disminuir la duración de la admisión del vapor en el cilindro para cada uno de los dos conductos. Es posible considerar cuatro periodos sucesivos en el funcionar de la *caja de revestimiento* de Clapeyron.

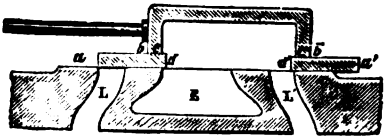


Fig. 682.

1er. *período :* hay *admisión del vapor*, que trabaja á *plena presión*, hasta que el *conducto de admisión* quede cerrado;

2e. *período:* hay *expansión* del vapor, que entonces trabaja á presión decreciente, hasta que el *conducto de salida* se abre;

3er. *período:* hay *salida* del vapor, pero que cesa por el hecho del revestimiento, antes de que el émbolo haya alcanzado el fondo del cilindro;

4e. *período :* hay *compresión* del residuo del vapor por el émbolo que lo impulsa y lo comprime antes de que empiece un nuevo período de admisión. De manera que la compresión termina el ciclo de los movimientos alternos de la caja.

745. **Perfeccionamientos introducidos en las máquinas de vapor.** — El principio de Carnot, que prueba que el rendimiento de un motor térmico aumenta á medida que se hace mayor la diferencia de las temperaturas del gas ó de los vapores entre el foco caliente y el foco frío, ha sido punto de partida para modificaciones importantes en las máquinas de vapor. En vez de emplear el vapor á una presión media de 2 atm., que corresponde á unos 2 kg. por cm², como en la máquina de Watt, se la tomó á temperatura más elevada, correspondiente á una presión de 5 kg. ; después, á medida que ha ido perfeccionándose la resistencia de las calderas, se ha llegado á utilizar sin dificultad presiones de 12 kg. y más aún.

Distínguense tres clases de máquinas de vapor según la elevación de la temperatura y, por consiguiente, según la tensión del vapor que se utiliza.

1°. Las máquinas *de baja presión* (de condensador), donde la tensión no pasa de 1 ó 2 atm ; 2°. las máquinas *de media presión*, donde la tensión permanece comprendida entre 3 y 5 atm. ; 3°. las máquinas de *alta presión* (sin condensador), donde el vapor trabaja á tensión superior á 5 atm.

746. **Perfeccionamiento en el mecanismo de las máquinas de simple expansión.** — En la construcción de las máquinas de vapor de simple expansión se han introducido gran número de perfeccionamientos ; vamos á indicar los principales.

1e. *Recalentamiento del vapor.* — El cilindro C (fig. 683), donde el vapor al dilatarse ó concentrarse impulsa el émbolo, está rodeado por una circulación de vapor procedente de la caldera. Esto permite llevar más lejos la expansión del vapor, impidiendo que se convierta en agua.

2e. *Distribución del vapor.* — El cajón de Watt presentaba inconvenientes bastante grandes. La fuerza necesaria para moverlo delante de los orificios de distribución era bastante grande. En segundo lugar, como los movimientos de obtu-

ración y de abertura de los orificios de entrada y de salida del vapor se efectuaban de manera lenta y progresiva, el vapor se encontraba sometido á acciones de laminado y de fricción que absorbían inútilmente parte de su calor. Además, el vapor caliente se enfriaba por contacto con la pared del cajón. Por fin y principalmente, los canales de comunicación entre el cajón y el cilindro, — cuyo volumen es por fuerza bastante considerable, — constituían *espacios perjudiciales*.

Estos inconvenientes se han corregido dotando á la máquina de cuatro cajones en vez de uno solo. Colócaseles completamente contra los fondos mismos del cilindro, de modo que supriman casi totalmente los espacios perjudiciales. Por otra parte, como cada cajón tiene su función propia, sea la introducción, sea la salida del vapor, evítase el enfriamiento del vapor motor por el que ya ha trabajado.

3°. *Expansión variable.* — En la máquina de Watt se obtenía la regularización de la velocidad obstruyendo más ó menos el orificio de la compuerta de llegada de vapor por medio de una válvula llamada *moderador*, que el regulador gobierna. De ahí resultaba naturalmente que el rendimiento de la máquina disminuye á medida que es más escaso el trabajo que se le exige, puesto que la presión y por consiguiente la temperatura del vapor, disminuyen á su entrada en la máquina.

Hoy se usa otro medio de regularizar la velocidad de la máquina : consiste en hacer variar á cada golpe del émbolo la cantidad de vapor introducida á plena presión, — proporcionalmente á la fuerza que se trata de producir : este es el sistema de *expansión variable*.

Distribución de pestillo. — El antiguo cajón se presta á este sistema, bastando hacer variar su recorrido según las necesidades. Pero en general se prefieren los *distribuidores* (fig. 683) que en realidad sólo son grandes llaves por cuya intervención se abre ó se cierra el paso del vapor gracias á un sencillo movimiento de rotación. Úsanse cuatro : dos tienen por misión alternativamente poner las dos extremidades del cilindro en comunicación con el condensador; los otros dos deben introducir el vapor en el momento necesario y sólo el tiempo preciso.

4°. *Doble expansión. — Sistema de Woolff.* — El uso de la doble expansión data del siglo último. Woolff lo adoptó primeramente para regularizar la marcha de las máquinas. En su sistema el vapor actuaba en plena presión durante todo el camino de un émbolo, yendo después á dilatarse en otro cilindro mucho mayor, antes de marcharse por fin al condensador.

Cada uno de los cilindros A, B, está provisto de una caja de vapor (fig. 684), donde se mueve un cajón ordinario, así como de orificios de admisión y de salida dispuestos de la manera ordinaria. El vapor llega por el orificio V y se difunde primero en la caja del cilindro A, pasando luego desde allí á la parte inferior del émbolo P. Este émbolo recibe entonces un movimiento de abajo arriba, impulsa al vapor que estaba encima de él y lo manda al tubo de salida E. En vez de comunicar con el condensador, este tubo va á desembocar en la caja de vapor del cilindro grande B. Ahí penetra por el orificio inferior de admisión, debajo del émbolo P' y dilatándose produce también el movimiento ascendente del

Explicación de la figura 683. — A, depósito rectangular, donde se difunde el vapor que llega por la válvula R. En cada extremo están fijos los distribuidores DD que abren ó cierran el paso del vapor en el cilindro, según los movimientos que les imprimen las bielas *tt'* ; B, depósito rectangulrr análogo el depósito A, pero destinado á recibir el vapor de salida cuando es puesto en comunicación con los cilindros por los distribuidores D' D' ; C, cilindro propiamente dicho donde se mueve el émbolo. Está protegido contra el enfriamiento exterior, así como los depósitos A y B por un revestimiento de madera. Además, es de doble pared, y el vapor recién llegado de la caldera, al circular por esta doble envoltura, impide la condensación del vapor que trabaja, durante su expansión.

E, biela que une la cabeza del émbolo, dirigida por la armadura de fundición de la máquina, con la manivela que pone en acción el árbol del volante; F, plataforma que sostiene el árbol de transmisión y unida con la armadura ; G, armadura de fundición, tallada de modo que sirva de guía á la cabeza del émbolo ; H, cabeza de biela y vástago de la bomba de aire del condensador; I, cabeza de biela y vástago de la bomba de alimentación que manda á la caldera agua caliente tomada al salir del condensador ; K, excéntrica que pone en movimiento, por medio de la biela *l* y del brazo *m* la plataforma *p* que gobierna la distribución ; L, balancín unido con el báculo del émbolo por una biela y articulado en torno del eje X. Este balancín transmite el movimiento á la bomba de aire y á la alimentación ;

M, regulador de fuerza centrífuga; N, volante; O, condensador; P, vaso donde el vapor que llega del cilindro encuentra el agua fría inyectada bajo forma de lluvia; R, llave-

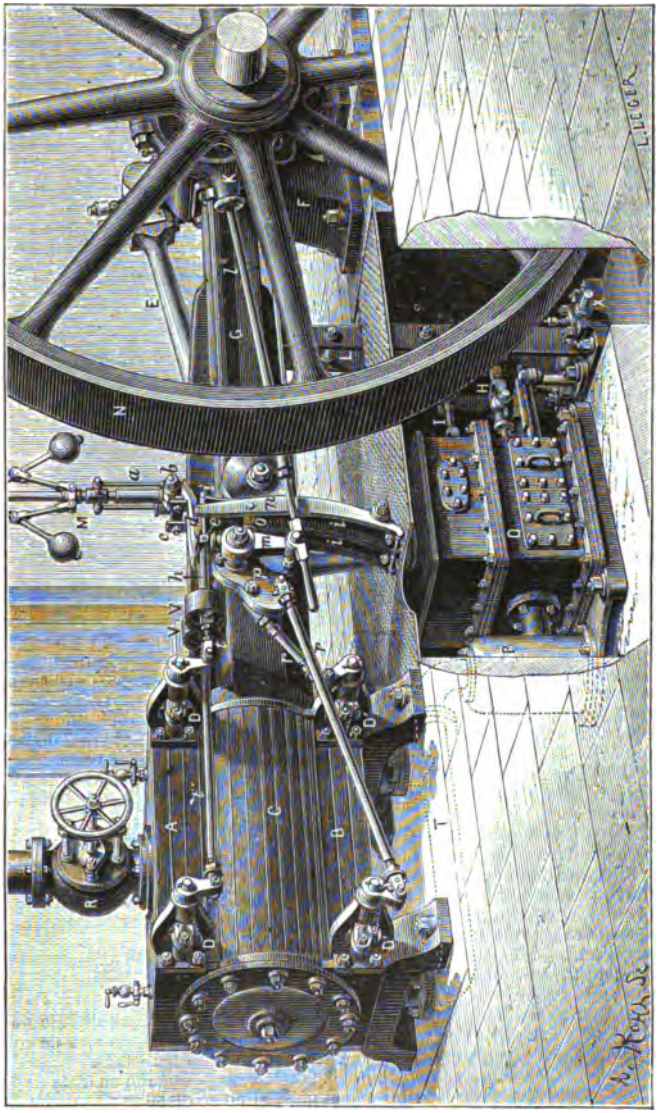


Fig. 683. — Tipo moderno de máquina de vapor fija horizontal de condensador (explicación en la pag. 684).

presa colocada á la llegada del vapor; T, tubos que ponen en comunicación al depósito B con el condensador; X, eje alrededor del cual oscila el balancín

émbolo, mientras que el vapor que estaba encima sale por el tubo CC, yendo por él al condensador.

Así ocurre que el movimiento simultáneo de los dos cajones en *sentido inverso* produce el movimiento simultáneo de los dos émbolos *en el mismo sentido*, traba-

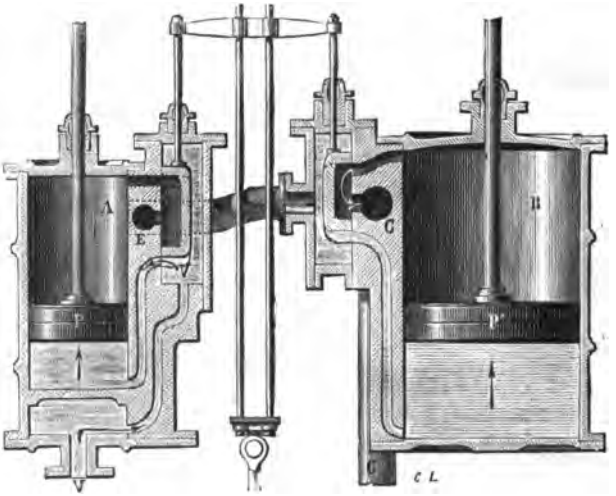


Fig. 684.

jando el vapor *á plena presión* en el cilindro menor y *con expansión* en el grande. Las máquinas que emplean este modo de expansión, se llaman *de dos cilindros*.

5°. *Sistema Compound.* — Este último sistema no era aplicable sino á las máquinas de baja presión. Cuando se llegó á usar de manera ordinaria presiones de 5 ó 6 kg, se adoptó el sistema llamado *Compound*, que se distingue del de Woolff en que entre los dos cilindros hay interpuesto un depósito de vapor.

Esta disposición permite dar á las manivelas que mueve cada cilindro el ángulo más favorable para obtener el esfuerzo más regular sobre el árbol de la máquina, y evita de esta manera la obligación de comunicar á los dos cilindros movimientos sincrónicos. Además se llega á llevar más lejos la expansión del vapor obligando á éste á dilatarse ya en el primer cilindro, llamado *cilindro de alta presión*.

6°. *Triple expansión y cuádruple expansión.* — Á fin de aumentar todavía más la expansión del vapor y para reducir por consiguiente al mínimum el gasto de combustible, se han creado tipos de máquinas de *triple* y *cuádruple* expansión. Estas máquinas están provistas de tres ó cuatro cilindros sucesivos por donde pasa el vapor sucesivamente. Entre ellos hay depósitos de vapor análogos al que caracteriza la máquina Compound.

Observación. — No debe creerse que las máquinas de varias expansiones sucesivas sean *siempre* más económicas que las de simple expansión, en lo relativo á consumo de vapor.

Puede observarse efectivamente que la multiplicación de los cilindros de expansión debe aumentar el rozamiento del mecanismo y las superficies de enfriamiento. Hay pues que observar un término medio según los casos.

La ventaja de las máquinas de doble expansión surge cuando se trata de fuerzas algo mayores, 400 ó 500 caballos y aun más, si no se dispone de presiones de vapor superiores á 6 kg. La triple y la cuádruple expansión se aplican á presiones de vapor de 12 á 15 kg y en las potencias muy grandes.

747. **Máquina de vapor horizontal fija.** — Gran número de estos perfeccionamientos se han realizado en el tipo moderno de máquina de vapor representado por la

figura 683. Llámasela *horizontal* por causa de la orientación del cilindro C, y *fija* porque está instalada de manera permanente. El vástago del émbolo ataca directamente por una biela E al árbol de manivela, lo que presenta la ventaja de permitir un enlace muy rígido y mucho menos voluminoso de todos los órganos. La sencillez del mecanismo y numerosos perfeccionamientos de detalle han permitido reducir mucho el consumo de vapor. En efecto, las antiguas máquinas de Watt consumen generalmente de 16 á 18 kg de vapor por caballo hora; pues bien la fija actual consume apenas de 8 á 9 para fuerzas inferiores á 100 caballos, y *menos aún* tratándose de potencias mayores.

748. **Perfeccionamientos introducidos en los condensadores.** — También se han introducido perfeccionamientos en el condensador de la máquina de Watt. Hoy se emplean tres tipos muy distintos de condensadores: los *condensadores de mezcla* los *eyecto-condensadores* y los *condensadores de superficie.*

1°. *Condensadores de mezcla.* — Los primeros sirven habitualmente en las máquinas donde el agua de que se dispone es á propósito para la alimentación de las calderas; de este modo basta con enviar á la caldera por medio de una bomba parte del agua ya caliente que sale del condensador.

2°. *Eyecto-condensador.* — Desde hace algún tiempo se usa un sistema de condensador de mezcla (fig. 685), análogo al inyector Giffard. Está dispuesto de manera que utiliza la aceleración de velocidad comunicada al agua por la condensación del vapor. Para cargar el aparato, esto es, para dar al agua fría que llega

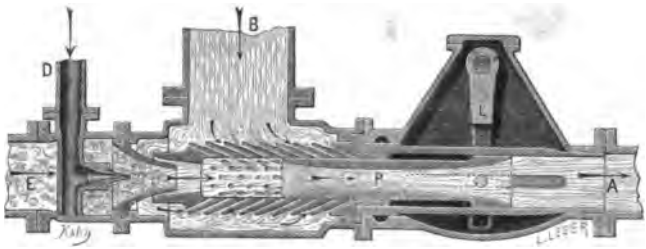


Fig. 685.

á B y que debe servir para la condensación su primer impulso, se empieza por introducir vapor á alta presión por el conducto D. Una vez bien establecida la circulación, el vapor de salida que llega á D continúa manteniendo el movimiento, y se suprime la llegada de vapor á alta presión.

El cilindro P que se mueve en el tubo G por medio de la palanca L, sirve para aumentar ó disminuir el número de los orificios de inyección del agua fría, para proporcionar su salida á la cantidad de vapor que se ha de condensar.

Según se ve, estos aparatos suprimen la pérdida de trabajo debida al funcionamiento de la bomba en los demás condensadores.

Condensadores de superficie. — Cuando no se dispone de una reserva de agua para alimentar las calderas, hay el mayor interés en condensar el vapor de salida de la máquina, á fin de poder utilizar indefinidamente la misma agua. Este caso se presenta especialmente en las *Máquinas marinas*, por ser el agua del mar impropia para el servicio de las calderas.

Entonces se usa el *condensador de superficie*, que no es hablando con propiedad más que una caldera invertida. Compónese efectivamente de un depósito metálico donde está obligado á circular el vapor de salida. Un haz de tubos atraviesa este recipiente, y una bomba mantiene una circulación continua de agua fría, tomada del mar por las navíos, pongamos como ejemplo, á través de los tubos. Hallándose el vapor en contacto con paredes frías, se condensa produciendo el vacío y es devuelto á la caldera por la bomba de alimentación.

749. **Máquinas marinas.** — Las máquinas llamadas *marinas* son las más poderosas que se fabrican; su poder llega á *muchos miles* de caballos-vapor. Además deben satisfacer á varias condiciones, especiales todas por causa de su destino, y en particular gran economía de combustible, á fin de que éste no ocupe dema-

siado sitio en el navío, y también una sencillez relativa del mecanismo que las ponga á cubierto de accidentes. Por esto no se adoptan en este caso las distribuciones de pestillo, mientras que se usa de ordinario la triple y la cuádruple expansión. Por otra parte, las necesidades de la navegación exigen que la máquina pueda girar á voluntad en un sentido ó en otro. Para obtener este resultado, precisa poder modificar durante la marcha el movimiento de los cajones. Esto se logra por una disposición mecánica llamada *corredera*, de que Stephenson construyó el primer modelo.

750. **Corredera de Stephenson.** — Este mecanismo (fig. 686) se compone en principio de dos platillos circulares y excéntricos, reunidos y adaptados sobre el árbol de la máquina según un ángulo determinado. Cada uno de ellos está rodeado por un collar de bronce A y A′ donde da vueltas y enlazado, por medio de una biela con la extremidad de la corredera propiamente dicha BB′. La corredera cuelga por la regla PB′ de la punta de un palanca acodillada HNP, y está

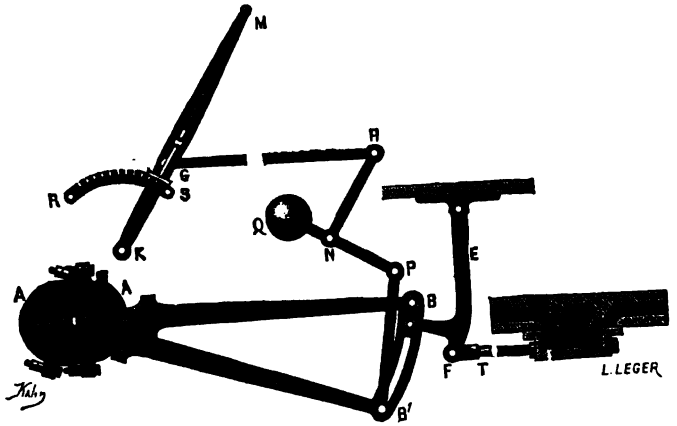


Fig. 686.

equilibrada por el contrapeso Q. Gracias á la palanca MK y al vástago GH se puede subir ó bajar la corredera. De ahí resulta que como el eje de gobierno T del vástago del cajón permanece al mismo nivel, puesto que se encuentra fijo en la extremidad de la palanca E, el cajón es guiado ya por la excéntrica A, ya por la excéntrica A′, según que esté abajo ó arriba la corredera. Es evidente que en una posición intermedia y no obstante el movimiento de las dos excéntricas, el punto F no se movería y que por consiguiente no se verificaría la distribución del vapor.

Por supuesto, en las máquinas de expansiones múltiples es necesario que el sentido de la distribución cambie al mismo tiempo en todos los cilindros.

751. **Máquinas locomotoras.** — Las máquinas llamadas *locomotoras* son máquinas de vapor aplicadas al transporte de los viajeros y de las mercancías en las vías férreas. Deben satisfacer á dos condiciones principales, lo mismo que las marinas: 1°. facilidad del cambio de marcha, que permite invertir el sentido de rotación de las ruedas; 2°. gran sencillez de mecanismo. De ahí resulta naturalmente que el empleo de la corredera está indicado en ellas, y que están proscritos los sistemas de distribución muy perfeccionados.

Hace ya algunos años que empezaron á construirse máquinas locomotoras de doble expansión; pero todavía no están muy extendidas y la gran mayoría de ellas es de simple expansión.

El servicio especial que deben desempeñar estas máquinas hace imposible dotarlas de un compensador, pues la cantidad de agua que habría que transportar para su alimentación sería demasiado considerable. Por otra parte, á fin de comunicar al movimiento de rotación de las ruedas mucha regularidad, se em-

plean dos cilindros cuyas bielas atacan manivelas dispuestas con inclinación de 90° sobre el eje de las ruedas. Esta disposición proporciona además la ventaja

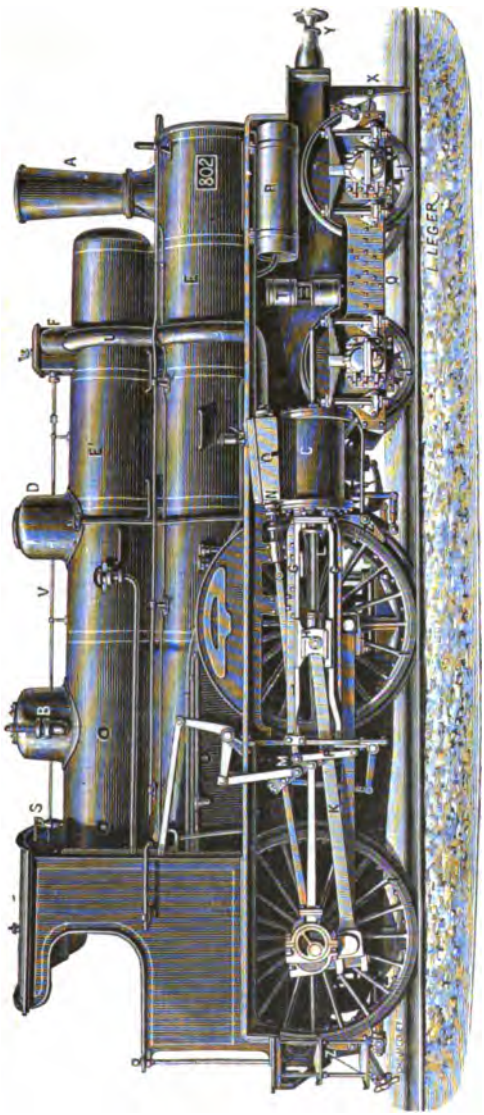


Fig. 687. — Locomotora mixta de gran velocidad (*Caminos de hierro del Este de Francia.*

A, chimenea ; B, válvula de seguridad ; C, cilindro ; D, depósito de arena ; E, cuerpo de la caldera ; E', depósito de vapor ; F, caja de vapor que contiene el registro que abre ó cierra la comunicación del vapor de la caldera con los cilindros ; G, resbaladeras guías del báculo del émbolo ; H, báculo del émbolo ; I, ruedas motoras ; J, ruedas de sostén ; K, biela ; L, vástago del émbolo ; M, corredera de Stephenson y movimiento de dirección de la distribución ; N, vástago da la caja de distribución ; O, estuche del cajón de distribución ; P, biela de reunión de las ruedas motoras ; Q, antetrén articulado ó bogga ; R, depósito de aire comprimido, para la dirección de los frenos automáticos ; S, silbato ; T, bomba de compresión de aire de vapor para el servicio de los frenos automáticos ; U, tubo que lleva el vapor de la caldera á los cilindros ; V, vástago de dirección del registro del vapor ; X, barrederas ; Y, tope de choque de resorte ; Z, cajón del freno.

de suprimir el punto muerto y de permitir que la máquina pueda echar á andar sea cual fuere la posición en que se encuentren las dos manivelas. En efecto,

por lo menos uno de los émbolos está siempre en posición favorable para ejercer su esfuerzo sobre una de las manivelas.

En general, las locomotoras están constituidas por una armadura resistente, de palastro de hierro, encima de la cual se coloca la caldera, y que está sostenida, mediante muelles, por un número más ó menos grande de ejes, según el peso de la máquina y el servicio á que se la destina.

Locomotora de pequeña velocidad. — La locomotora llamada *de pequeña velocidad* tiene cuatro ejes motores, con ruedas del mismo diámetro todos. El esfuerzo de tracción de este tipo es considerable, pero por el contrario su velocidad es reducida. Además, como el mecanismo y los ejes motores están repartidos en dos grupos distintos que pueden oscilar independientemente uno de otro alrededor de un eje vertical, resulta de ahí gran facilidad para el paso en las curvas de pequeño radio. Por consiguiente, este género de máquina conviene en las vías de poca anchura que tienen un trazado sinuoso y que presentan fuertes pendientes.

Locomotora de gran velocidad. — La locomotora representada en la figura 687 está, por el contrario, destinada á arrastrar pesos relativamente pequeños, pero con grandes velocidades y en vías sensiblemente llanas.

Es de simple expansión, quiere decir que el vapor sale directamente á la atmósfera, después de haber trabajado en los dos cilindros situados simétricamente á cada lado de la armadura, en vez de dilatarse en cilindros de baja presión como en la máquina precedente, que lleva dos cilindros de alta presión y dos de baja.

Según se ve en la figura, sólo dos ejes son motores y llevan ruedas de mucho diámetro. En consecuencia, con estas máquinas se pueden obtener velocidades de 100 kilómetros por hora.

752. **Locomóviles.** — Al lado de los tres tipos de máquinas de vapor que hemos estudiado, máquinas fijas, máquinas marinas y

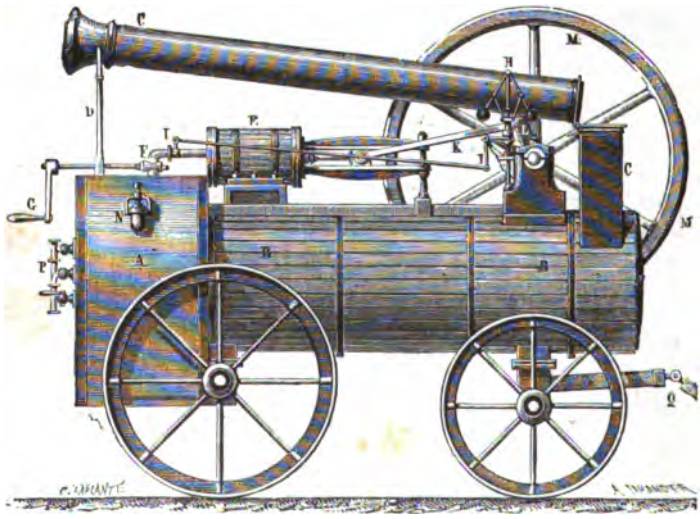


Fig. 688. — *Locomóvil Calla.*

A, BB, caja de fuego y cuerpo cilíndrico tubular; C, chimenea; E, cilindro; M, volante; KL, biela y manivela; H, II, reguladores.

locomotoras, existe un tipo intermedio muy importante por lo múltiple de sus aplicaciones : son las *locomóviles.*

El nombre de *máquina fija* caracteriza perfectamente los motores de vapor de la gran industria (fig. 684) que están instalados de manera permanente y que se gastan en el punto mismo donde han trabajado. El nombre de *locomotora* indica también claramente la función de la máquina de vapor de los caminos de hierro, que emplea su poder en transportarse á sí misma, á la vez que arrastra consigo un tren más ó menos pesado. La *máquina marina* participa al mismo tiempo de los dos primeros tipos; pues por una parte está instalada de manera permanente en el navío que la lleva, y por otra no lo arrastra sino moviéndose á sí misma.

La *locomóvil* (fig. 688) es un tipo intermedio que no se parece á la locomotora sino en el nombre y el aspecto exterior. En resumen, es una máquina fija pero también transportable. Está dispuesta, como la locomotora, en una armadura y montada sobre ruedas, que no son motoras : sólo sirven para la locomoción de la máquina en los caminos ó por los campos, con ayuda de dos caballos uncidos al timón. La caldera es tubular, y se compone de un fogón A, situado en la parte posterior y del cilindro BB donde están contenidos los tubos. Este cilindro es horizontal y se encuentra sobre la caldera. El vástago del émbolo, guiado por una resbaladera, pone en acción la biela K, que se articula con la manivela del árbol motor y del volante.

753. **Máquinas de aire caliente.** — 1°. *Principio.* — No es posible elevar la temperatura máxima del vapor de agua ni por consiguiente aumentar el coeficiente económico de los motores de vapor á causa de las dificultades que llevan consigo las altas presiones que sería necesario alcanzar. Este inconveniente quedaría suprimido si se reemplazara el vapor de agua, cuya tensión crece tan rápidamente con la temperatura, por el aire caliente ú otro gas cualquiera cuya fuerza elástica sólo crezca en razón directa del binomio.

$$(1 + \alpha T).$$

Este ha sido el motivo de que se pensara en la construcción de los motores de *aire caliente*.

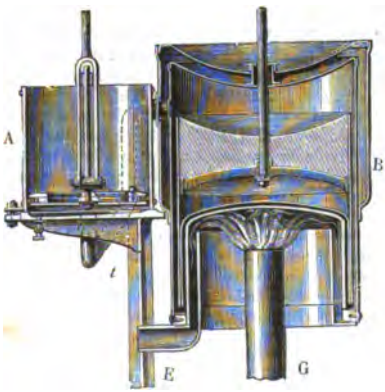


Fig. 689.

2°. *Máquina Lobereau.* — Uno de los más sencillos de estos motores es la pequeña máquina Lobereau, de simple efecto como la máquina de vapor primitiva de Newcomen.

Descripción y funcionamiento. — Imaginemos dos cilindros A y B de diámetros bastante diferentes (fig. 689). El más pequeño A comunica por la cara superior

con la atmósfera y por el conducto H con el cilindro B. Él es el que constituye

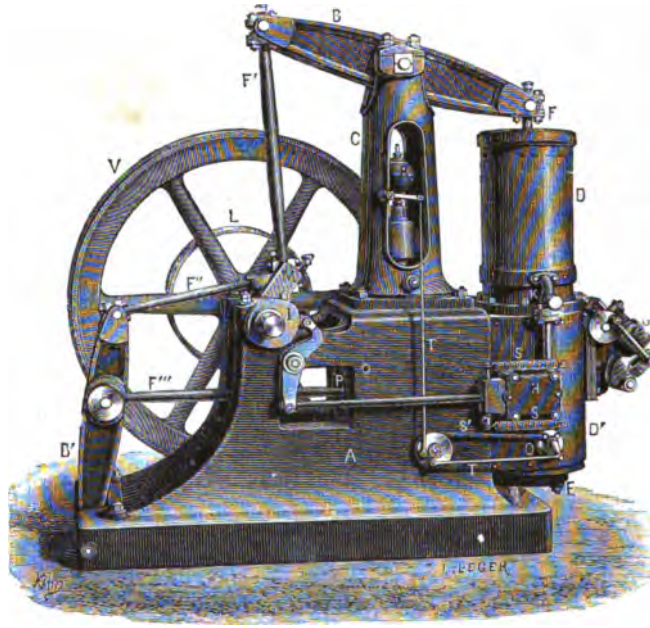


Fig. 690. — Motor de aire caliente (*sistema Bénier*).

A, armadura de fundición que sostiene todo el mecanismo; B, balancín que recibe el esfuerzo del émbolo motor; B' balancín que transmite el esfuerzo de la manivela á la bomba impelente de aire; C, columna de fundición que sostiene el balancín; D, cilindro de fundición abierto en su parte superior: la parte inferior D' es de doble pared y permite una circulación de agua destinada á impedir excesivo aumento de temperatura; E obturador del fondo del cilindro por donde se retiran las cenizas y las escorias acumuladas durante la marcha. Encima de este obturador está la reja donde se quema el carbón, en lo interior mismo del cilindro; F, cabeza de la biela del émbolo motor; F', biela que transmite el movimiento del balancín á la manivela; F'', biela que devuelve el movimiento de la manivela al balancín B'; F'', biela que pone en acción la bomba de aire; G, mecanismo que comprende un obturador de resbaladera de forma especial que permite introducir poco á poco el combustible en el cilindro durante el funcionamiento; H, cajón de distribución gobernado por el diente de una palanca articulada I, y que es impulsado hacia atrás por los muelles S, S: este órgano introduce en el momento conveniente el aire impulsado por la bomba de aire debajo de la reja del fogón en el cilindro motor; I, diente que gobierna el cajón de distribución; K, llave que permite hacer penetrar pequeña cantidad del aire impulsado por la bomba encima del fogón, para obligar á bajar las cenizas é impedir que se ensucie el cilindro; L, polea motora; M, manivela; O, llave gobernada por el regulador y que determina la cantidad de agua introducida debajo del fogón á cada golpe de bomba, proporcionalmente al esfuerzo pedido á la máquina; P, bomba de aire; R, regulador de fuerza centrífuga; S, S', muelles de llamada; T, vástagos que transmiten las oscilaciones del regulador á la llave O; V, volante. Un segundo diente, análogo al que se ve en el dibujo; pero situado por la parte del volante, levanta en el momento conveniente una válvula por donde pasa, primero á un tubo, y después al exterior, el aire dilatado que acaba de expulsar el émbolo.

cu erpo de bomba donde se mueve el émbolo P. El otro cilindro B sirve a

mismo tiempo de caldera y de distribuidor. Ahí es efectivamente donde la masa de aire expuesta á la acción de un mechero de gas *b* se calienta, se dilata y, pasando debajo del émbolo P por los conductos *tt*, la levanta hasta la parte más alta de su carrera. En este momento baja en el cilindro B una masa de yeso PP', de forma de émbolo. Esta masa funciona como un cajón de distribución para desalojar al aire caliente y expulsarlo á la parte alta del cilindro B por los intersticios que deja entre su superficie exterior y la pared interna del cilindro. Entonces el aire se enfría al mismo tiempo por la interposición de un cuerpo mal conductor entre él y el foco de calor, y por una corriente de agua fría que circula en torno suyo. Su fuerza elástica disminuye hasta el punto de no equilibrar ya la presión atmosférica que se ejerce encima del émbolo P. Este vuelve entonces hasta la parte más baja de su camino. Al mismo tiempo sube otra vez la masa PP', el aire queda expuesto de nuevo á la acción del calor del mechero de gas y continúa el movimiento de vaivén. Este movimiento se facilita y se regulariza gracias á un volante á que se da vueltas con la mano para poner en marcha el aparato.

3°. *Motores de aire caliente.* — Compónense (fig. 690) de una bomba de aire horizontal movida por una biela, que aspira el aire exterior y lo obliga á penetrar debajo de la reja de un fogón herméticamente cerrado.

Al atravesar el aire el coke incandescente que cubre la reja, se dilata y rechaza al émbolo motor vertical que se encuentra situado sobre el fogón mismo. Cuando el émbolo motor ha llegado á lo más alto de su camino, el aire dilatado se escapa al exterior por una chimenea á través de una válvula que funciona por acción de un diente de engranaje.

El volante almacena la energía producida por el movimiento ascendente del émbolo motor y una parte de ella se utiliza en poner en acción la bomba impelente de aire. Un regulador de fuerza centrífuga aumenta ó disminuye la cantidad de aire enviado por esta bomba debajo del fogón, según la potencia que se exige al motor para conservar constante la velocidad.

Se observará que en este sistema no sirve de motor el mismo aire caliente y enfriado : el aire caliente que sale al exterior después de haber obrado sobre el émbolo posee todavía enorme cantidad de calor no utilizado ; sin embargo, no obstante estas pérdidas considerables se llega á mejor utilización del combustible que en las máquinas de vapor, puesto que el consumo no es superior á 600 gramos de coke por caballo y por hora. Para evitar la disociación de los aceites de engrasado, se emplean en general productos obtenidos por destilación del petroleo.

754. **Motores de gas.** — Se ha tratado de utilizar la energía producida por la deflagración de una mezcla de gas combustible y de aire para mover las máquinas.

Estos motores se llaman *de explosión*; pero en realidad el principio de su funcionamiento es análogo al de los motores de aire caliente. La combustión del gas tiene efectivamente como resultado dilatar el aire, á la manera que lo efectúa en el motor descrito antes el paso del fluido á través del coke incandescente.

La mayoría de los motores de gas actualmente empleados son del sistema *de semi-simple efecto*, que funciona siguiendo un *ciclo de cuatro tiempos*.

La figura 691 representa uno de estos motores de gas.

Un émbolo enlazado con la manivela del árbol motor que sostiene el volante, se mueve en un cilindro cerrado únicamente por su parte posterior.

1er TIEMPO. — Supongamos que el émbolo esté en la posición extrema de su carrera, cerca del fondo del cilindro, y hagamos dar vueltas el árbol motor por medio de una potencia mecánica auxiliar. — El émbolo se mueve y hace el vacío detrás de sí. Una caja de distribución T, dirigida por un contra-árbol, abre entonces dos orificios, uno de los cuales comunica con el aire exterior y el otro con un depósito de gas de alumbrado. Si las secciones de los canales abductores del aire y del gas están convenientemente dispuestas, la mezcla que llena el cilindro durante toda la marcha hacia adelante del émbolo es pues una mezcla detonante.

2°. TIEMPO. — Una vez que llega al término de su camino, como el árbol motor sigue girando, el émbolo vuelve sobre sí mismo. Pero en este momento el cajón cierra los orificios de aire y de gas, de modo que la mezcla detonante se comprime cada vez más hasta el momento en que el émbolo ya en la extremidad de

su camino atrás no ocupa sino una cámara de pequeña dimensión dispuesta entre el émbolo y el fondo del cilindro.

3er. TIEMPO. — En el momento en que la manivela del árbol motor pasa del punto muerto, un contacto eléctrico pone en acción un carrete de inducción, y salta una chispa eléctrica entre los puntos de dos alambres de platino, que penetran dentro del cilindro, aislados en la masa de una bujía de porcelana.

La mezcla inflamada por la chispa se dilata y rechaza el émbolo, que transmite la energía al volante por la biela y el árbol.

4°. TIEMPO. — Una vez en el término de su carrera hacia adelante, el émbolo vuelve sobre sí mismo; entonces un diente pone en acción una palanca que levanta una válvula por la cual salen siguiendo un tubo los gases quemados, que van á perderse en la atmósfera.

OBSERVACIONES. — 1°. Obsérvase que cuando el motor produce energía es sólo durante el tercer tiempo. Se necesita por tanto que esté provisto de volantes muy pesados que almacenan los esfuerzos, á la vez que los regularizan.

2°. La compresión de la mezcla gaseosa durante el segundo tiempo tiene por objeto aumentar su inflamabilidad. De ahí resulta que se pueden utilizar mezclas gaseosas pobres en gas combustible y por consiguiente económicas. Desde hace algún tiempo se ha llegado hasta utilizar motores que aprovechan los gases producidos por la disociación del vapor de agua mezclado de aire que atraviesa coke incandescente. Estos se llaman *gases de agua* ó *gases pobres*.

3°. En el punto de vista de utilización del combustible, los motores de gas que funcionan por medio de los gases pobres son, á lo menos por el momento, los motores térmicos que dan mayor rendimiento. En efecto, para potencias de 150 á 200 caballos-vapor se llega á no gastar más de 500 gramos de combustible por caballo y por hora.

4°. Para combatir la elevación de temperatura del cilindro bajo la influencia de la combustión del gas, se le rodea de una doble pared donde se hace circular una corriente de agua.

EXPLICACIÓN DE LA FIGURA 691. — A, tubo por donde es aspirado el aire exterior durante el primer tiempo; B tope de cobre fijo en una bujía aisladora de porcelana, que penetra por una juntura hermética dentro de una cámara practicada en la caja y que está atravesada en su centro por dos alambres de platino aislados: uno de ellos está soldado por un extremo al tope y se acerca por el otro extremo hasta escasa distancia de la punta del segundo alambre de platino, que por su parte comunica con la masa misma del motor. Por consiguiente, la corriente de un carrete de Ruhmkorff una vez lanzada por el tope B, saltará la chispa eléctrica dentro de la cámara misma de la caja, volviendo la corriente al carrete de inducción por la masa del motor y el segundo alambre; C, cilindro de doble pared entre las cuales circula una corriente de agua fría para impedir exagerada elevación de temperatura. Este cilindro está abierto en su extremidad anterior, pues la biela F se encuentra articulada directamente sobre el émbolo: dase á éste longitud bastante grande respecto de su diámetro para que se dirija facilmente á sí mismo durante su camino. El fondo del cilindro está taladrado por un agujero delante del cual se mueve el cajón; D, árbol que gobierna el cajón y la válvula de escape; no da más que una vuelta por dos revoluciones del árbol del volante. Es gobernado por el árbol de la máquina mediante dos engranajes; E, tubo provisto de una llave que lleva el agua necesaria al enfriamiento del cilindro; F, biela que transmite los movimientos del émbolo á la manivela; G, llave que regula la llegada del gas; H, diente que actúa una vez por vuelta del árbol D sobre la pieza O y la palanca I para levantar la válvula de salida de los gases quemados; I, palanca que transmite los movimientos del diente H; K, chapa que sostiene una rueda sobre la cual actúa la palanca I, tendiendo el muelle cilíndrico, para rechazar el vástago de la válvula de salida; L, volante que regulariza la marcha del motor; M, tubo de evacuación del agua de enfriamiento; N, polea; O, rueda que suaviza el frotamiento del diente H; P, resbaladera enlazada con la caja y que la arrastra en su movimiento de vaivén por acción del movimiento de un botón de manivela X; R, regulador péndulo, compuesto de un vástago que sostiene en sus dos extremidades masas de momento casi igual, de modo que estas oscilaciones sean relativamente lentas no obstante la escasa longitud del radio. La extremidad inferior del vastago sostiene un tope que para ó deja escaparse un espolón inserto en una varilla adaptada al cajón y que participa de su movimiento, según que el del cajón es más rápido ó más lento que el del péndulo. Cuando la velocidad del motor disminuye por efecto del trabajo exigido á la

máquina, e espolón rechaza la varilla de una válvula que cierra la llegada del gas y permite por consiguiente que se produzca la mezcla gaseosa, detonando cuando es oportuno. Por el contrario, si la velocidad es demasiado grande, el espolón deja de mantener el vástago de la válvula : entonces no puede seguir efectuándose la aspiración del gas, no

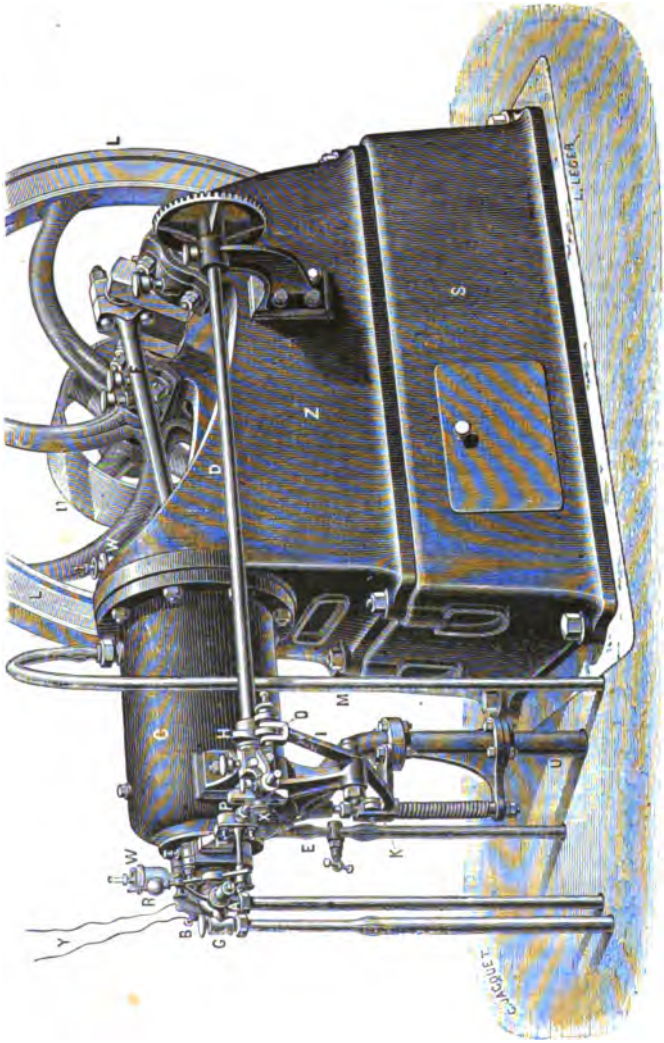


Fig. 691. — Motor de gas (sistema sencillo).

se efectúan las explosiones y la velocidad disminuye ; S, zócalo de undición que sostiene el motor ; T, caja de distribución ; U, tubo de salida de los gases quemados ; X, botón de una manivela fija en la extremidad del árbol D ; Y, alambre que lleva la corriente del carrete de inducción ; Z, armadura del motor; W, engrasadores.

755. **Cálculo del trabajo suministrado por los motores térmicos.** — Existen dos categorías de aparatos que permiten calcular la potencia desarrollada por los motores : son los *frenos* y los *indicadores*.

Los frenos tienen como función absorber la energía disponible del motor, permitiendo simultáneamente calcular esta energía. El más conocido y sencillo de estos aparatos es el de Prony, único que vamos á describir.

Otro género de aparatos, — cuyo primer tipo fué el indicador de Watt, — permite calcular la potencia de los motores que utilizan la expansión de los gases y de los vapores. La energía de un motor de esta clase puede ser estimada fácilmente por los datos que siguen :

1°. Volumen engendrado por segundo por el émbolo que se mueve en el cilindro ;

2°. Presión media del vapor (aire ó gas caliente) que actúa sobre el cilindro.

La expresión de la potencia (en kgm por segundo) desarrollada por el motor está representada en efecto por la igualdad

$$W = n\ S\ CH,$$

en que S es la superficie del émbolo en metros cuadrados, C el camino en metros del émbolo en un segundo, H la presión media en kilogramos del fluido sobre el émbolo durante su movimiento, y n el número de vueltas por segundo.

Los valores de S y de C son datos de construcción de la máquina ; n se obtiene contando el número de vueltas durante un minuto y dividiendo por 60. Los indicadores se usan para obtener H.

756. **Freno de Prony.** — Sea (fig. 692) el árbol de asiento de un motor cualquiera cuya potencia se quiere calcular. En este árbol se fija una polea H, perfectamente por su centro, y en torno de la cual se dispone una especie de collar, C, que está provisto interiormente de cuñas de madera b y sostiene un brazo de palanca terminado en un arco de círculo concéntrico al eje de la polea. De ahí

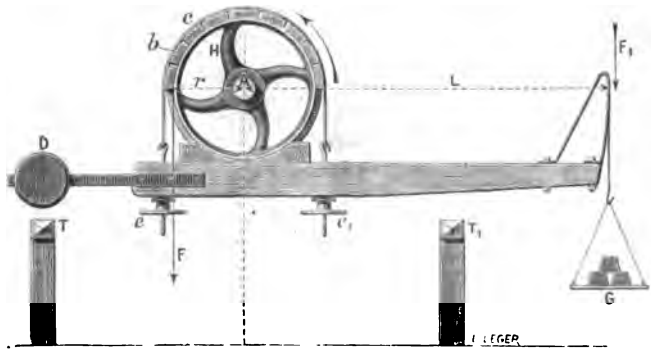


Fig. 692.

resulta que la longitud eficaz de la palanca es L Las tuercas e, e_1, permiten apretar más ó menos el collar en torno de la polea H. Un contrapeso D, opuesto á la palanca, la equilibra perfectamente, así como el platillo H suspendido del garfio, de tal manera que, estando en reposo el árbol A, puede la palanca colocarse entre los dos topes T y T_1 que limitan sus movimientos.

Puesta en marcha la máquina en el sentido de la flecha, se comprende inmediatamente que la palanca va á ser arrastrada contra el tope T si el collar C está apretado en torno de la polea.

Arreglando convenientemente la presión de las tuercas e, e_1, — lo que disminuye ó aumenta naturalmente el trabajo absorbido por el freno, — se llega á conservar al motor su velocidad de régimen, ó de otro modo, la velocidad con que debe funcionar en servicio normal.

Entonces se vuelve la palanca á su posición primitiva, media entre los dos lopes, valiéndos de pesos conocidos que se colocan en el platillo G.

Al llegar este momento, el esfuerzo del motor será por tanto compensado exactamente por la acción del peso en la extremidad de la palanca.

Podemos admitir en efecto que el trabajo de frotamiento de la polea en el freno actúa como una fuerza F vertical, tangente á la polea en la extremidad del radio r, mientras que los pesos que actúan sobre el garfio C representan una fuerza F_1, también vertical, pero dirigida en sentido contrario.

Arreglado convenientemente el freno y una vez en equilibrio la palanca L entre los dos topes T y T_1, es evidente que el momento de la fuerza F es igual al de la fuerza F'; siendo este último igual á PL, obtenemos $Fr = PL$.

Siendo el trabajo igual al producto del esfuerzo por el camino recorrido, su expresión será en el caso que nos ocupa,

$$W = F \times 2\pi\, rn.$$

Basta con sustituir Fr por su valor, y tenemos en fin como expresión del trabajo

$$W = PL\, 2\pi\, n.$$

Observación. — El freno da resultados exactos; pero es un aparato de absorción y, por consiguiente, no permite darse cuenta exacta del trabajo suministrado realmente por un motor cuando éste se utiliza pongamos por ejemplo en una fábrica.

757. **Indicador de presión.** — El indicador usado actualmente tiene escasa analogía con el que ideó Watt. Compónese principalmente de un cilindro de bronce en que puede moverse un émbolo P (fig. 693), fijo en un muelle R. El aparato se adapta en el fondo del cilindro de la máquina que se trata de ensayar y comunica con el interior por medio de la llave D. El vástago del émbolo está articulado en una de las ramas de un paralelógramo que tiene por función dirigir el lápiz C en línea recta, á la vez que amplifica unas 5 veces los movimientos del émbolo.

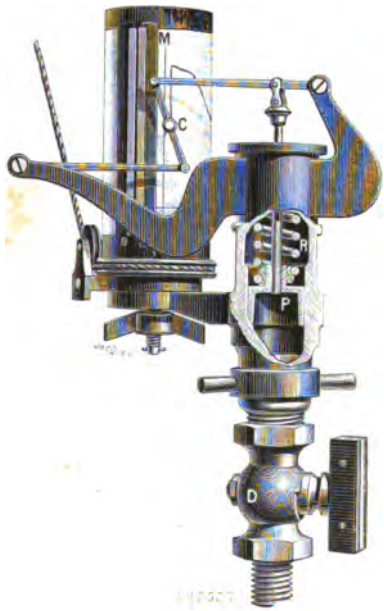


Fig. 693.

Delante de la punta del lápiz C se dispone un cilindro M donde se arrolla una hoja de papel. Una cuerdecilla, arrollada en la parte baja del cilindro, va á unirse con la cabeza del émbolo de la máquina por medio de enlaces apropiados de poleas. Un muelle interior al cilindro tiende á ponerlo siempre en la posición que indica la figura: de ahí resulta que el movimiento del émbolo motor es transmitido al cilindro y le imprime un movimiento alternado igual á 2/3 de circunferencia próximamente.

Cerrada la llave D y una vez andando la máquina que se trata de ensayar, el lápiz C marca sobre el cilindro un rasgo horizontal que representa la línea de presión atmosférica.

Si entonces se abre la llave D, la presión se transmite al émbolo del indicador, que comprime el muelle proporcionalmente á esta presión, moviendo al mismo tiempo el lápiz sobre el cilindro.

Como los movimientos del lápiz C, proporcionales á la presión del fluido mo-

tor, son paralelos á una generatriz del cilindro M, mientras que los movimientos del émbolo de la máquina producen un movimiento de rotación cuyo sentido es perpendicular, resulta que la punta del lápiz trazará una curva cerrada sobre la hoja de papel.

Un punto cualquiera de la curva trazada por el indicador representa al mismo tiempo la posición del émbolo dentro del cilindro y la presión del fluido que actuaba sobre él en un momento dado. Luego el área circunscrita por la curva f, f_1, g_1, g, representa el trabajo desarrollado sobre la cara del émbolo durante una vuelta de la máquina.

Puede calcularse la superficie del diagrama, sea valiéndose de un instrumento llamado *planímetro*, sea por un método geométrico.

Observaciones. — 1°. No se ha hablado más que de lo que ocurre sobre una de las caras del émbolo; como el fluido motor actúa alternativamente sobre las dos caras en la mayor parte de las máquinas, es necesario hacer un diagrama á cada lado del cilindro. Entonces representa la potencia de la máquina la suma de las potencias calculadas sobre las dos caras.

2°. *Trabajo indicado.* — Llámase *trabajo indicado* al resultado obtenido por el cálculo de los diagramas. Ahora bien, es evidente que la potencia utilizable de la máquina le es inferior. El frotamiento de los órganos, el trabajo necesario para hacer funcionar los condensadores, cajones de distribución, bombas, etc., es bastante considerable y por lo demás varía mucho según el tipo de las máquinas. Con frecuencia pasa de 10 o/o aun en las buenas. Puede calcularse el trabajo perdido en vencer estas resistencias pasivas comparando resultados que dé el freno Prony con el trabajo indicado por los diagramas. La diferencia representa la pérdida de potencia causada por el funcionamiento mismo de la máquina.

LIBRO IX

MAGNETISMO

CAPÍTULO PRIMERO

PROPIEDADES DE LOS IMANES.

758. **Imanes naturales, imanes artificiales: definiciones.** —Llámase *imanes* á unas sustancias que tienen la propiedad de atraer el hierro y algunos otros metales, como el niquel, el cobalto, el manganeso y el cromo.

Hay un imán natural y además imanes artificiales. El *imán natural* ó *piedra imán*, es un óxido de hierro designado en química por el nombre de *óxido salino* ó de *óxido magnético de hierro*[1], y representado por la fórmula Fe^3O^4. Los *imanes artificiales* son barras ó agujas de acero templado, que tienen las mismas propiedades generales que los imanes naturales: esas propiedades les son comunicadas artificialmente por métodos particulares (792).

El poder atractivo de los imanes se ejerce á todas las distancias y á través de todos los cuerpos; disminuye con mucha rapidez cuando la distancia aumenta. También decrece á medida que sube su temperatura y recobra poco á poco su valor inicial una vez que se les enfria hasta el grado primitivo, *con tal que no se haya traspasado cierto límite*[2].

Desígnase por el nombre de *magnetismo* la causa desconocida de esta propiedad. También se llama así (*Magnetismo*) á la parte de la física que trata del estudio de los imanes[3].

759. **Polos y línea neutra. – Puntos consecuentes.** — Los imanes no poseen en todos sus puntos la misma fuerza atractiva. En efecto, si se hace rodar una barra imantada en limadura de hierro, se ve

1. Es un mineral de hierro, muy abundante en los terrenos de formación antigua, sobre todo en Suecia y Noruega. Sin embargo, sólo pequeña parte del óxido de hierro llamado magnético tiene la propiedad que este calificativo expresa.

2. Efectivamente, *á la temperatura roja*, desaparece por completo y definitivamente toda imantación.

3. Este es el magnetismo propiamente dicho, que no tiene nada que ver con el *mesmerismo*, impropiamente llamado *magnetismo animal*.

que gran cantidad de ésta se reune en los extremos, á manera de borlas erizadas (fig. 694); pero la adherencia de la limadura disminuye rápidamente á medida que nos alejamos de las puntas, hasta la parte media de la barra, donde es nula. La región del imán donde la fuerza magnética es insensible ha recibido el nombre de *línea neutra* y las dos regiones cercanas á los extremos, donde se manifiesta el máximum de atracción, se denominan *polos*.

Fig. 694.

Todo imán, natural ó artificial, presenta dos polos y una línea neutra; sin embargo, en la imantación de las barras se producen á veces polos contrarios que alternan entre los polos extremos. Esto es lo que se llama *polos secundarios* ó *puntos consecuentes*. Ya son en número par, ya en impar. Supondremos siempre que los imanes no tienen más que dos polos; así sucede de ordinario cuando se someten á los métodos usuales de imantación masas de acero que tienen la forma sea de barras prismáticas, sea de vástagos cilíndricos.

760. **Agujas imantadas.** — También se da frecuentemente á los imanes la forma de láminas delgadas, que se cortan en forma de rombos muy prolongados : llámaseles entonces *agujas imantadas* (fig. 696). Una aguja imantada está destinada á servir de imán móvil; así es que generalmente tiene en su centro de gravedad un pequeño hueco, por el cual se la coloca y se la hace oscilar sobre un eje vertical ú horizontal.

761. **Distinción de los polos.** — Si se coloca una aguja imantada sobre un eje vertical y se la abandona á sí misma, se ve que después de varias oscilaciones se fija en una posición de equilibrio que parecerá invariable (fig. 695). Si se la separa de esta posición, volverá á ella espontáneamente y siempre se dirigirá hacia un punto constante del horizonte el mismo extremo de la aguja. Uno mira al polo Norte geográfico, y el otro en la dirección del polo Sur.

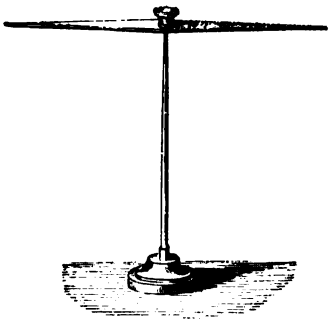


Fig. 695.

Sea cual fuere la causa de esta orientación constante, basta para distinguir los polos uno de otro. En los dibujos se ha convenido en designar el primer polo por las letras A, *a*, ó mejor N y el segundo por B, *b*, ó mejor S. Se llamará

polos *del mismo nombre* á los que están designados por la misma letra en agujas diferentes. Tienen idénticas propiedades.

762. **Acciones mutuas de los polos.** — Los dos polos de un imán parecen idénticos entre sí cuando se les presenta á la limadura de hierro; pero si se suspende una aguja imantada *ab* (fig. 696) de un hilo fino, y se acerca á su polo *a* el polo A de otra aguja, inmediatamente se produce viva repulsión; por el contrario, acercando el mismo polo A al polo *b* de la aguja móvil, hay fuerte atracción. Luego, los polos *a* y *b* no son idénticos, puesto que uno es rechazado y el otro atraído por el mismo polo A del imán fijo. Análogamente, el polo B produce dos acciones contrarias en los polos *a* y *b*, pero en sentido inverso. Con uno hay repulsión y atracción con el otro. De ahí se deduce que las acciones recíprocas entre dos imanes se encuentran sometidas á esta ley : *Los polos del mismo nombre se rechazan y los polos de nombres contrarios se atraen.*

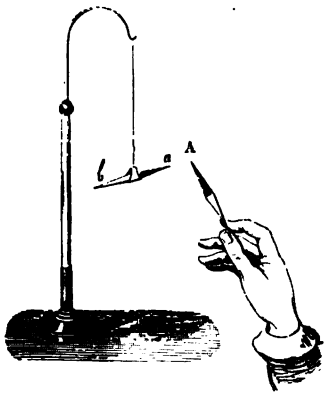


Fig. 696.

Si se compara la Tierra (según hizo Gilbert) con un inmenso imán cuyos polos magnéticos estuvieran situados respectivamente en las cercanías de los polos geográficos, en virtud de la ley precedente debe el polo austral de la aguja volverse hacia el polo Boreal ó polo Norte terrestre, y por el contrario, el polo boreal de la aguja hacia el polo Austral ó polo Sur terrestre. De esto proceden los dobles nombres (contradictorios en apariencia) de polo *Norte* ó *Austral* y de polo *Sur* ó *Boreal*, que antaño se daban á las extremidades de un imán [1].

En las agujas imantadas tiene generalmente el polo Norte coloración *azul* (por un ligero recocido).

763. *Teoría del magnetismo.* — 1°. *Hipótesis de Ampère.* — Ampère imaginó una teoría del magnetismo, fundada en las propiedades de las corrientes eléctricas. Esta es la única adoptada actualmente; la expondremos más adelante, una vez descritos los fenómenos eléctricos de que es consecuencia.

2°. *Hipótesis de dos fluidos magnéticos.* — Durante mucho tiempo se admitió otra hipótesis, llamada de los *fluidos magnéticos;* pero ya no tiene sino interés histórico. Admitíanse dos fluidos imponderables, cada uno de los cuales actuaba por repulsión sobre sí mismo y atrac-

[1] Hoy se usan exclusivamente las denominaciones de *polo Norte* y de *polo Sur*.

ción sobre el otro; estos fluidos se designaban por los nombres respectivos de *fluido austral* y de *fluido boreal*, según los de los polos de imán en que predominan sus acciones.

Admitíase que los dos fluidos se desarrollan simultáneamente, en cantidades equivalentes; pero sin que haya medio de separarlos. Un imán tiene siempre dos polos y constantemente presenta los dos fluidos aparentes.

3°. *Experiencia de los imanes rotos.* — La experiencia de los *imanes rotos* demuestra que cada partícula de un cuerpo imantado es un verdadero imán que tiene dos polos. En efecto, si se toma una aguja de acero que tenga dos polos separados por una línea neutra y se

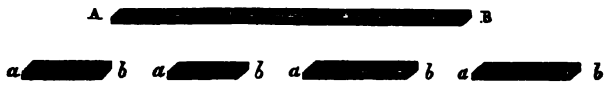


Fig. 697.

la rompe en su punto medio, cada mitad de aguja es un imán completo como la aguja entera (fig. 697). Si después se dividen de la misma manera estos nuevos imanes en dos partes, se observa también que cada una de ellas es un imán completo; y así sucesivamente, en tanto que se pueda continuar la división.

4°. *Constitución de los imanes.* — De consiguiente, todo imán puede ser considerado como constituido por infinidad de imanes infinitamente pequeños ó *elementos magnéticos.*

Pueden concebirse varios modos de agrupación de estos elementos *idénticos.*

Si se les supone agrupados de manera que sus líneas de los polos estén orientadas paralelamente, se tiene un imán, *uniformemente imantado.*

Si se les reune punta á punta por los polos de nombres contrarios y siguiendo una línea cualquiera, se constituye una *red magnética solenoidal.*

Por fin, si se les supone plantados normalmente en una superficie cualquiera, de modo que sus polos del mismo nombre formen una superficie continua, se constituye una *hoja magnética.*

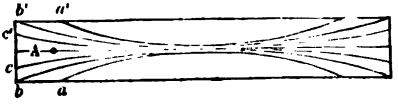


Fig. 698.

5°. *Teoría de Jamin.* — Las experiencias de Jamin sobre el magnetismo lo han conducido á considerar los imanes como constituidos por redes solenoidales que siendo paralelas en la región neutra, se ensanchan en sus extremos para terminar en los diversos puntos de la superficie (fig. 698). La cantidad de magnetismo libre en cada elemento es proporcional á los números de polos que hay en ella.

764. **Fuerza coercitiva.** — Llámase *fuerza coercitiva* á la causa más ó menos intensa que se opone, sea á la imantación de las sustancias magnéticas, sea á su desimantación. Esta fuerza parece nula en el hierro dulce, puesto que este metal se imanta instantáneamente por la influencia de un imán; es mayor ó menor en el acero templado, según la energía del temple.

La experiencia prueba en efecto que una barra de acero puesta en contacto con un imán no se imanta sino lentamente; hasta se necesita frotarlo con uno de los polos del imán, para que adquiera toda su fuerza; además, una vez imantada la barra de acero, no pierde sus propiedades magnéticas sino con mucha dificultad. Por la oxidación, la presión ó la torsión puede adquirir el hierro dulce cierta fuerza coercitiva, pero que es de poca duración.

765. **Distinción de las sustancias magnéticas y de los imanes.** — Llámase *sustancias magnéticas* á las que son atraídas por el imán, cómo el hierro, el acero, el niquel. Los compuestos ferruginosos son generalmente magnéticos, y tanto más cuanto más hierro contienen.

Es fácil distinguir una sustancia magnética de un imán : la primera *no tiene polos* ; presentándola sucesivamente á las dos extremidades de una aguja imantada (móvil sobre un eje vertical), tal como *ab* (fig. 696), las atrae igualmente á las dos, mientras que un polo de imán atraería una y rechazaría la otra.

Las sustancias magnéticas privadas de fuerza coercitiva, como el hierro dulce, el niquel puro, dejan de ser atraídas por el imán cuando se las lleva á una temperatura suficientemente elevada que se llama *temperatura crítica*. Así, el hierro dulce deja bruscamente de ser magnético á eso de 780° y el niquel hacia los 350°.

766. **Imantación por influencia.** — **Fantasmas magnéticos.** — Cuando una sustancia magnética es puesta en contacto con una barra imantada, se convierte mientras persiste el contacto en un imán completo, con dos polos y una línea neutra. Por ejemplo, si se hace sostener por uno de los polos de un imán un pequeño cilindro de hierro dulce *ab* (fig. 699), este cilindro puede sostener á su vez

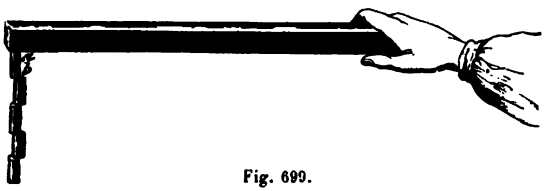


Fig. 699.

otro análogo, el segundo un tercero, y así sucesivamente, hasta siete ú ocho, según la barra. De manera que cada uno de ellos se ha convertido en imán, é imán sigue siendo mientras dura la influencia ; pero desde que se suprime el contacto con el primer cilindro, esta influencia cesa : en seguida se desprenden los cilindros, sin conservar rastro de magnetismo alguno.

Este fenómeno permite explicar la formación de las borlas de limadura que se pegan á los polos de los imanes (fig. 694). Las partículas que están en contacto con el imán se convierten en otros tantos pequeños imanes y actúan por influencia sobre las partículas veci-

nas; éstas lo hacen á su vez sobre las siguientes, y así en lo sucesivo, hasta cierta distancia en que la influencia acaba por hacerse nula.

La imantación por influencia se produce también á distancia, pero con tanta mayor intensidad cuanto más escasa es esta distancia y más fuerte el imán. Así es como se producen las figuras simétricas (fig. 700) llamadas *fantasmas* ó *espectros magnéticos*. Obtiénense estas curvas aplicando sobre una barra horizontal un cartón delgado que se espolvorea, por medio de un pequeño cedazo con una capa de limadura de hierro.

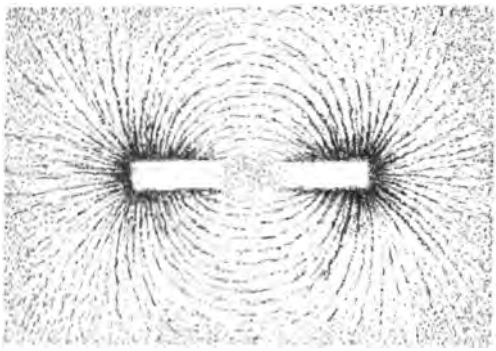


Fig. 700.

Ésta se dispone espontáneamente, bajo la influencia de los polos de los imanes, en curvas regulares, que van de uno á otro polo y que cambian de dirección en las extremidades de la barra. Puede fijarse

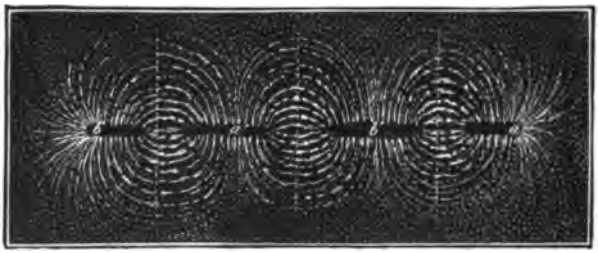


Fig 701.

el *espectro magnético* obteniéndolo sobre un papel engomado que después se moja por medio de un vaporizador.

En el caso de que la barra imantada tenga puntos consecuentes, el espectro magnético presenta la forma de la figura 701.

767. **Líneas de fuerza y Campo magnético.** — Estas curvas magnéticas fueron las que dieron á Faraday la idea de las *líneas de fuerza*. Llamó así á las líneas según las cuales se ejercen las atracciones y las repulsiones magnéticas (y eléctricas). En los fantasmas magnéticos están perfectamente determinadas por las líneas de limadura (figs. 700, 701). Conviene dar á las líneas de fuerza un *sentido*: se

considera que se propagan desde la región Norte hacia la región Sur del imán.

La porción del espacio en que se ejerce la acción atractiva ó repulsiva de un polo de imán se ha llamado *campo magnético* de este polo. Es más ó menos extenso, según que el polo es más ó menos fuerte[1].

Las consideraciones de líneas de fuerza y de campo magnético (ó eléctrico) han adquirido gran importancia en el lenguaje y teorías modernas de magnetismo y de electricidad.

768. **Leyes de las atracciones y de las repulsiones magnéticas.** — Los fenómenos de atracción y de repulsión magnética han sido estudiados por Coulomb, quien descubrió dos leyes que se pueden reunir en el enunciado siguiente :

Dos polos magnéticos se atraen (ó se repelen) en razón inversa del cuadrado de su distancia y en razón directa del producto de sus masas magnéticas.

Coulomb definía la *masa* de un polo magnético por la acción del magnetismo terrestre. Dos polos tenían la misma masa ó intensidad magnética cuando experimentaban acciones iguales por parte de la tierra; dos polos de idéntica masa magnética constituían por su reunión un polo de masa ó de intensidad doble, etc. Comprobó estas leyes por dos métodos, el de la balanza de torsión [2] y el de las oscilaciones [3].

769. **Fórmula de las leyes de Coulomb. — Unidad de magnetismo.** — De las leyes precedentes resulta que la atracción ó la repulsión que se ejerce entre dos polos de imán, de masas μ y μ', separados por una distancia d, es expresada por la fórmula

$$F = k\,\frac{\mu\mu'}{d^2},$$

siendo k una constante que representa la acción recíproca de dos masas magnéticas iguales á 1 y separadas por la distancia 1. El valor de k dependerá de la elección de las unidades de fuerza y de magnetismo.

Se ha llamado *unidad de magnetismo* ó *unidad de masa magnética* (en el sistema C.G.S.) á la cantidad de magnetismo que hay que suponer concentrada en un polo de imán para que la acción ejercida, á la distancia de *un centímetro*, sobre una masa idéntica, sea igual á una *dina*. Dase á la masa el signo + ó el signo —, según se trata del magnetismo que carga un polo Norte ó del que carga un polo Sur.

Definida así esta unidad, la fuerza que se ejerce entre dos masas

1. La acción se ejerce teóricamente en todo el espacio ; pero deja pronto de hacerse sentir cuando aumenta la distancia.

2. Pronto se verá la descripción de la balanza de Coulomb y su uso en el estudio de las acciones eléctricas. Cuanto al método general de las oscilaciones, se le ha expuesto anteriormente (72,2°).

3. Mejor aún las han demostrado *a posteriori* las experiencias de Gauss (756).

μ y μ', concentradas en dos polos separados por una distancia d, se expresa (en *dinas*) por la fórmula

$$F = \frac{\mu\mu'}{d^2}.$$

Cuando la fuerza F es repulsiva, su valor es positivo (pues entonces μ y μ' tienen el mismo signo); cuando es atractiva, lleva el signo — (pues μ y μ' son de signos contrarios).

770. **Intensidad de un campo magnético.** — Un polo de imán colocado en un campo magnético, sufre en él una atracción ó una repulsión, que depende al mismo tiempo de la masa magnética de este polo y de la *intensidad del campo.*

Llámase *intensidad de un campo magnético* en un punto á la magnitud de la fuerza que actuaria en este punto sobre la unidad de magnetismo Norte.

Sea h la intensidad de un campo en un punto; la fuerza F que actúa en este punto sobre un polo magnético de masa μ está dada por la ecuación de Coulomb. Tiénese $F = \mu h$. La dirección de la fuerza es la dirección del campo.

771. **Campo magnético uniforme.** — Llámase *campo magnético uniforme* á un campo en que la fuerza magnética ejercida en cada punto sobre la unidad de magnetismo Norte es *constante* en magnitud y dirección. El magnetismo terrestre produce un campo magnético que es sensiblemente uniforme *en un espacio limitado* (fig. 702 y 703).

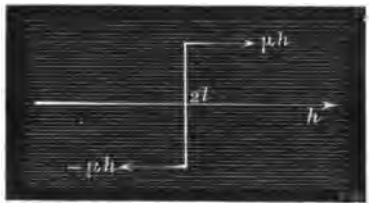


Fig. 702.

772. **Definición precisa de los polos.** — Cuando un imán está colocado en un campo uniforme, cada elemento de magnetismo experimenta una acción paralela al campo (fig. 702). Como estas acciones forman un sistema de fuerzas paralelas, es posible componerlas, según se hace con los pesos de los diferentes elementos de un cuerpo. El punto de aplicación de la resultante, centro de este sistema de fuerzas paralelas, se llama *polo* del sistema. Y como la experiencia prueba (777) que hay dos sistemas iguales de fuerzas paralelas y opuestas, existen dos polos. Luego, una barra imantada es reducible en un campo uniforme á dos polos iguales, puntos donde están concentrados respectivamente los magnetismos Norte y Sur, que cargan la barra, y que están invariablemente unidos entre sí.

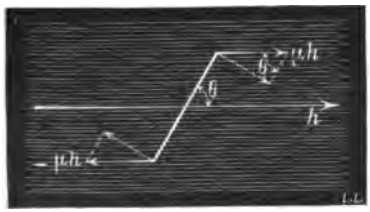


Fig. 703.

773. **Momento magnético de una barra imantada. — Intensidad de imantación.** — Cuando una barra imantada de modo regular se encuentra en un campo magnético uniforme, está sometida á dos fuerzas iguales y contrarias aplicadas en sus dos polos y que forman un par.

Si el imán está colocado normalmente á la dirección fija del par (fig. 702) éste tenderá á hacerlo girar, para ponerlo en su propia dirección. El momento del par de rotación será para esta posición $2lF$, llamando $2l$ la longitud de la aguja. Sustituyendo F por su valor, se tendrá $-C = 2\,l\mu h$.

Si el imán forma un ángulo θ con la dirección del campo (fig. 703), el momento $C\theta$ será

$$C\theta = 2\,l\,\mu h \text{ sen } \theta = C. \text{ sen } \theta.$$

El producto $2\,l\mu$ se denomina *momento magnético* de la barra imantada: se

le representa por la letra M. De modo que se puede escribir $C\theta = Mh \operatorname{sen} \theta$.

Si se obtiene el cociente del momento magnético M de un imán *uniforme* por su volumen V, resulta lo que se llama la *intensidad de imantación* A de la barra. Tiénese $A = \frac{M}{V}$.

774. **Experiencias de Gauss. — Demostración de la ley de Coulomb.** — Admitamos la ley de Coulomb y veamos algunas de sus consecuencias.

Claro es que el polo m, situado á igual distancia de los polos μ y $-\mu$, sufre la atracción f y la repulsión igual $-f$ (fig. 704); la resultante x es visiblemente la base de un triángulo isósceles de lado f; luego

$$x = 2f \cos (f, x);$$

pero

$$\cos (f, x) = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \operatorname{sen} \beta;$$

designando por l la semi-distancia de los polos, se tiene

$$\operatorname{Sm} \beta = \frac{l}{d}; \quad \text{de donde} \quad x = \frac{2f.l}{d}.$$

Pero

$$f = \frac{\mu m}{d^2}, \quad \text{luego} \quad x = \frac{2\,\mu m l}{d^3}.$$

Fig. 704.

Como la aguja $(m, -m)$ toma una posición de equilibrio bajo la acción de la fuerza x debida al imán desviador y de la fuerza H_1 debida á la tierra, se tiene, llamando α al ángulo de la aguja con su posición de equilibrio:

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{x}{H_1} = \frac{m.2\mu l}{d^3.H_1};$$

pero $\quad H_1 = mH \quad$ y $\quad 2\,\mu.l = M, \quad$ de donde $\quad \operatorname{tang} \alpha = \frac{M.}{H.d^3}.$

Eligiendo una distancia d muy grande relativamente respecto de las dimensiones de la barra desviadora y de la aguja móvil, se observa que:

1°. El ángulo de desviación α es independiente de la aguja desviada;

2°. Que la tangente de este ángulo varía en razón inversa del cubo de la distancia á que se coloca la barra desviadora;

3°. Volviendo la barra punta por punta, la desviación cambia de signo;

4°. Demuéstrase por el cálculo que la barra desviadora movida paralelamente á sí misma y llevada sobre una perpendicular al meridiano que pasa por el centro de la aguja móvil, da origen á una desviación doble de la precedente.

Estas consecuencias de la ley de Coulomb han sido demostradas experimentalmente por Gauss y de esta manera queda la ley de Coulomb probada *a posteriori*.

775. **Potencial magnético.** — Como las atracciones y las repulsiones magnéticas son definidas por la ley del cuadrado de las distancias, se puede aplicar al magnetismo la teoría del potencial [1].

Llámase *potencial magnético* en un punto cualquiera (donde se supone concentrada la unidad del magnetismo Norte) la suma

$$\frac{\mu_1}{r_1} + \frac{\mu_2}{r_2} + \ldots = \Sigma \left(\frac{\mu}{r}\right) = V,$$

en la cual $\mu_1, \mu_2 \ldots$ son las masas magnéticas, positivas ó negativas, diseminadas en el campo magnético, y $r_1, r_2 \ldots$ las distancias respectivas del punto á las diferentes masas.

Todas las propiedades que demostraremos más adelante respecto del potencial eléctrico, se aplican al magnético.

1. Como esta teoría será expuesta al hablar de las acciones eléctricas, nos limitaremos aquí a la definición.

776. **Acción de los imanes sobre todos los cuerpos. — Sustancias diamagnéticas.** — Ya en 1802 observó Coulomb que los imanes actúan con mayor ó menor fuerza sobre *todos* los cuerpos. Notó este fenómeno haciendo oscilar pequeñas barras de diferentes sustancias, primero entre los polos opuestos de dos fuertes barras imantadas, y después lejos de la influencia de todo imán. La comparación de los números de oscilaciones ejecutadas, en ambos casos en tiempos iguales, ponía de manifiesto la acción magnética.

Al principio se atribuyó este fenómeno á la presencia de materias ferruginosas en los cuerpos sometidos á la experiencia ; pero Lebaillif, Faraday y Becquerel demostraron que los imanes ejercen realmente una acción sobre *todos los cuerpos*, inclusos los gases.

Se ha observado además que esta acción es ya atractiva ya repulsiva : los cuerpos atraídos reciben el nombre de *cuerpos magnéticos* ó *paramagnéticos* y los que son rechazados el de *sustancias diamagnéticas*. Entre estos últimos están el bismuto, el plomo, el azufre, la cera, el agua etc.

Observación. — Las sustancias magnéticas situadas en un campo se cubren de magnetismo Norte en las regiones donde las líneas de fuerza del campo penetran en el cuerpo y de magnetismo Sud en las regiones donde salen del cuerpo. La contrario ocurre con las sustancias *diamagnéticas*.

CAPÍTULO II

MAGNETISMO TERRESTRE.

BRÚJULAS DE DECLINACIÓN Y DE INCLINACIÓN.

777. **Acción de la tierra sobre los imanes. — Par terrestre.** — Cuando se suspende una aguja imantada de un hilo (fig. 696) ó si se la pone sobre un eje en torno del cual puede girar libremente (fig. 705), en vez de pararse la aguja en una posición cualquiera, acaba por fijarse siempre en una dirección cercana á la de la línea norte-sud : luego la acción terrestre sobre una aguja imantada equivale á un sistema de fuerzas. ¿ Es un sistema *cualquiera*, reducible á un par *más* una fuerza? Esto es lo que va á decirnos la experiencia.

1°. *La acción magnética terrestre no tiene componente vertical.* — Se ha observado en efecto, por medio de pesadas muy precisas, que una barra de acero no pesa más *después* que *antes* de la imantación.

2°. *La acción magnética terrestre no tiene componente horizontal.* — En efecto, si en un vaso lleno de agua se coloca un disco de corcho, y encima de éste una barra imantada, el corcho oscila primeramente

y después se fija en una posición tal que la línea de los polos del imán sea sensiblemente paralela á la línea Norte-Sud geográfica (fig. 706); pero el corcho y la barra no adelantan ni hacia el norte ni hacia el sur.

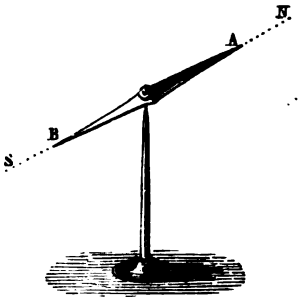


Fig. 705.

3°. *La acción magnética terrestre se reduce á un par.* — En efecto, puesto que el sistema de fuerzas magnéticas terrestres no tiene ni componente vertical ni componente horizontal, debe admitirse que se reduce á *un par*. Esto es lo que se llama el *par terrestre*.

La existencia del par terrestre es por tanto, un hecho experimental, independiente de toda hipótesis sobre el origen del magnetismo terrestre. El par terrestre quedará completamente definido cuando se conozca: 1°. La *dirección* en un punto

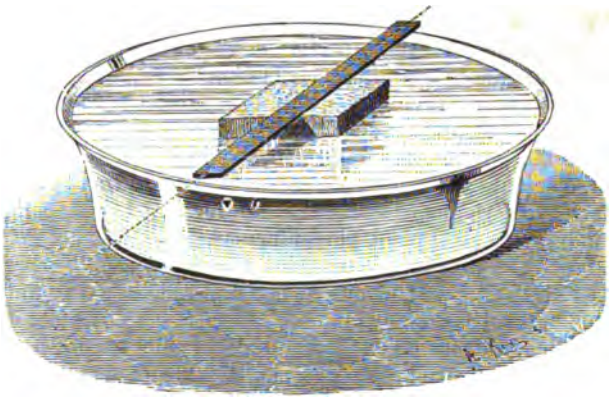


Fig. 706.

dado de la tierra; 2°. el *momento* de la *acción* que ejerce sobre un imán dado.

778. **Dirección del par terrestre. — Meridiano magnético. — Declinación ó Inclinación.** — Sábese que el *meridiano astronómico* en un punto de la superficie del globo es el plano que pasa por este punto y por los dos polos terrestres, y que el *meridiano geográfico* es la traza de este plano sobre el plano del horizonte del lugar. Análogamente, se llama *meridiano magnético* de un lugar dado al plano vertical que pasa por la dirección del par terrestre de este lugar.

Más adelante demostraremos que el meridiano magnético coincide con el plano vertical trazado por la dirección de equilibrio de la línea

de los polos de una aguja de *declinación* (aguja imantada móvil sobre un eje vertical). Con frecuencia se utiliza esta propiedad para definir el meridiano magnético. Esta dirección de equilibrio de la aguja imantada es á su vez la *meridiana magnética*, pues es la traza del meridiano magnético sobre el horizonte geográfico.

En general el meridiano magnético no coincide con el astronómico de un lugar. Llámase *declinación magnética* en un punto al ángulo del meridiano magnético con el astronómico, ó lo que es lo mismo, al ángulo que forma la aguja de declinación con la meridiana geográfica. La declinación es *oriental* ú *occidental*, según que el polo Norte de la aguja se coloque al este ó al oeste del meridiano astronómico.

Llámase *inclinación magnética* al ángulo que forma la dirección del par terrestre con la horizontal del lugar. Mídese la inclinación por el ángulo que la punta norte (la punta *azul*) de una *aguja de inclinación* (aguja imantada móvil en torno de un eje horizontal) forma con la horizontal de su centro de suspensión, cuando el plano vertical en que se mueve la aguja *coincide con el meridiano magnético del lugar*.

779. **Medida de la declinación y de la inclinación.** — Una aguja imantada que estuviera suspendida por su centro de gravedad de tal modo que pudiese moverse *libremente* en el espacio, se pondría espontáneamente en equilibrio en la dirección que tiene el par terrestre en el lugar de la experiencia. De esta posición de equilibrio se deduciría inmediatamente: 1°. la posición del meridiano magnético; 2°. la declinación; 3°. la inclinación.

Pero semejante suspensión no puede obtenerse. Una aguja imantada está necesariamente sujeta el eje en torno del cual se mueve y no es móvil sino en el plano perpendicular á este eje. Si el eje es vertical la aguja se mueve en un plano horizontal: entonces es una *aguja de declinación;* si el eje es horizontal, la aguja se mueve en un plano vertical: es una *aguja de inclinación*. En el primer caso, la posición de equilibrio da la dirección de la componente horizontal del par terrestre; en el segundo caso, la posición de equilibrio corresponde no ya al par terrestre mismo, sino á su componente en el plano mismo donde se mueve la aguja de inclinación.

780. **Principio de los métodos de medida : Descomposición del par terrestre.** — Todos los métodos de medida de la inclinación y la declinación magnética se fundan en la descomposición mecánica de las fuerzas del par terrestre.

Sea A uno de los polos de una aguja imantada, que supondremos *libremente suspendida*. Esta aguja se mueve espontáneamente en equilibrio (fig. 707) en la dirección del par terrestre. Sea AF una de las fuerzas del par; el ángulo FAN, que forma la dirección AF con su proyección sobre el plano horizontal x A y, es, por definición, la inclinación I; y el plano vertical zNS, que pasa por la dirección AF, es el meridiano magnético.

Descompongamos la fuerza F según tres direcciones rectangulares cualesquiera. Sean primeramente las dos componentes T y Z en el plano del meridiano: tienen como valores respectivamente

$$T = F \cos I, \qquad Z = F \operatorname{sen} I.$$

Descompongamos ahora la componente horizontal T en su plano; llamando α al azimut del plano de las xz, se tendrá

$$X = T \cos \alpha = F \cos I \cos \alpha, \qquad Y = T \operatorname{sen} \alpha = F \cos I \operatorname{sen} \alpha$$

De ahí resultan inmediatamente las consecuencias siguientes :

1°. Si la aguja no es móvil más que en un plano horizontal (aguja de declinación), cada uno de sus polos estará sometido á una fuerza igual á T. Así permanecerá en equilibrio, cuando se encuentre en la dirección del par (T, — T), es decir, según la traza del meridiano magnético. Compréndese porqué *sirve la aguja de declinación para determinar el meridiano magnético.*

2°. Si la aguja es móvil en un plano vertical (aguja de inclinación), su ángulo con la horizontal no medirá la inclinación I sino en tanto que su azimut coincida con el meridiano magnético.

En cualquier otro azimut, cada polo estará sometido á dos fuerzas X y Z ó á su resultante F'; estará, pues, en equilibrio en la dirección del par (F', — F'), que es diferente del par terrestre. El ángulo que formará con el horizonte en esta posición de equilibrio será un ángulo I', diferente de I, pero enlazado con I por una ecuación fácil de formular. En efecto, I' es el ángulo F'AX que forma la resultante parcial F', que está en el plano x A z, con la componente X. Pero se tiene

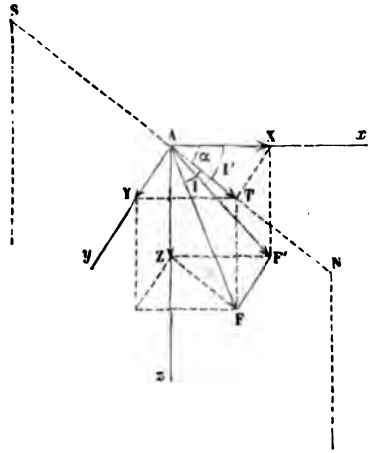


Fig. 707.

$$[1] \qquad \operatorname{tang} I' = \frac{Z}{X} = \frac{F \operatorname{sen} I}{F \cos I \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tang} I}{\cos \alpha}.$$

Á veces es cómodo considerar la cotangente en vez de la tangente. Sábese que es igual á la inversa de la tangente. Tiénese pues

$$[2] \qquad \cot I' = \frac{1}{\operatorname{tang} I} \cos \alpha = \cot I \cos \alpha.$$

781. **Brújula de declinación.** — La declinación magnética en un lugar dado se mide por medio de instrumentos especiales, llamados *brújulas de declinación.*

Descripción. — La brújula de declinación *ordinaria* se compone de una caja de cobre rojo AB (fig. 708) en cuyo centro está una aguja imantada *ab*, móvil sobre un eje. En la pared de la caja se adaptan dos montantes que sostienen un eje horizontal X, donde se encuentra fijo un anteojo astronómico L, móvil en un plano vertical. La caja AB está sostenida por un pie P sobre el cual gira libremente en sentido horizontal, arrastrando consigo el anteojo. Un círculo fijo QR, que se llama *círculo azimutal*, sirve para medir por medio de un vernier V dispuesto en la caja los ángulos de rotación del anteojo.

Por fin, la inclinación del anteojo respecto del horizonte se mide con ayuda de un vernier K, que recibe su movimiento del eje del anteojo, moviéndose sobre un arco de círculo graduado y fijo x.

Fig. 708.

Operación. — I. *Caso en que el meridiano astronómico del lugar es conocido.* — Se empieza por disponer la brújula de manera perfectamente horizontal, mediante tornillos de nivel S, S, y de un nivel n; después se lleva el anteojo al plano del meridiano astronómico y se toma nota de la posición del vernier sobre el círculo graduado QR. Después se hace dar vuelta á la caja AB hasta que el polo norte de la aguja queda exactamente frente á un punto de referencia marcado en la pared, en el plano vertical del anteojo: el arco que se ha hecho girar el vernier sobre el círculo expresa la declinación, que es occidental ú oriental, según el sentido de la rotación.

II. *Caso en que el meridiano astrónomico del lugar no es conocido.* — Puede determinársele por medio de la brújula misma. Con tal fin se hace uso del círculo azimutal QR y del arco de círculo x. Obsérvase con el anteojo un astro conocido, antes y después de su paso por el meridiano y se aplica el *método de las alturas iguales* descrito en los tratados de cosmografía para determinar la meridiana.

782. **Causas de error y correcciones : Método de inversión.** — El eje magnético de la aguja, es decir, la recta mn que pasa por sus dos polos, debe coincidir con el de la figura, quiere decir, con la recta ab que une sus dos extremos. En general no queda satisfecha esta condición. El error que de ahí resulta se corrige por el método de inversión.

Colocada sencillamente la aguja, sin fijarla, es posible retirarla y volver á ponerla en su lugar después de haberla invertido. Entonces se efectúa una segunda observación de la declinación y la media aritmética de los dos resultados es igual á la declinación verdadera. En efecto, tenlase en la primera experiencia (fig. 709).

$$aN = D - am,$$

y de la segunda resulta (fig. 710).

$$[aN] = D + am, \qquad \text{de donde} \qquad \frac{aN + [aN]}{2} = D;$$

de manera que la declinación verdadera es la *media aritmética de las dos declinaciones observadas.*

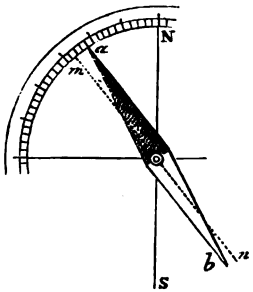


Fig. 709.

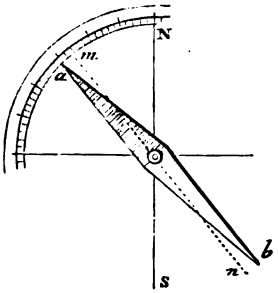


Fig. 710.

783. **Brújula marina.** — La acción directora de la tierra sobre la aguja imantada ha tenido importante aplicación en la *brújula marina*, llamada también *compás de*

Fig. 711.

variación y *compás de mar*. Es sencillamente una brújula de declinación que se utiliza en el mar para dirigir la marcha de los navíos[1] (fig. 711).

Descripción del instrumento. — La brújula consiste en una caja cilíndrica de cobre BB', lastrada en su parte inferior por una masa de plomo, y suspendida á la Cardán; de esta manera conserva la posición horizontal no obstante el balanceo y las sacudidas del navío. En el fondo de la caja hay fijo un eje vertical

1. No se sabe quien inventó la brújula ni la época precisa de su descubrimiento. Guyot de Provins, poeta francés del siglo XII, habla ya del uso del imán en la navegación. Los antiguos navegantes, que no conocían la brújula, no tenían más guías que el sol ó la estrella polar así es que se veían obligados á no perder de vista las costas.

donde se dispone, encima de pequeña chapa, una barra imantada (fig. 712): esta es la *aguja* de la brújula; sobre un disco de talco de más ó menos diámetro se pega otro de papel O, en que se marca la *rosa de los vientos*. Dase este nombre á una estrella de 32 brazos, que abarca los 8 rumbos de viento, los semi-rumbos y los cuartos de rumbo. Uno de los brazos termina en una pequeña estrella y va marcada con una N; corresponde á la barra *ab*, que se encuentra debajo del disco, y que señala el meridiano magnético.

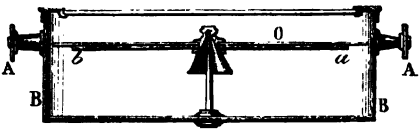


Fig. 712.

Uso de la brújula. — La brújula se encuentra colocada en la popa de los buques, dentro de la *bitácora*. Para utilizarla se empieza por buscar en una carta marina cuál es el rumbo de viento según el cual ha de dirigirse el barco. Entonces el timonel mira á la brújula y da vuelta al timón hasta que el rumbo determinado, señalado en la rosa, vaya á coincidir con la *línea de fe*: dase este nombre á una línea que pasa por una marca *d* indicada en la pared interior de la caja BB', y dirigida paralelamente á la quilla del buque. Sin embargo, en esta maniobra hay que tener en cuenta las variaciones que sufre la declinación en los diferentes puntos del globo y corregir continuamente las indicaciones de la brújula.

784. **Variaciones de la declinación.** — La declinación de la aguja imantada, muy variable de un punto á otro, es *occidental* en Europa y en África, *oriental* en Asia y ambas Américas. Además, presenta numerosas variaciones en un mismo lugar unas, que se pueden considerar como regulares, son seculares, anuales ó diurnas; las otras, que son irregulares, se designan con el nombre de *perturbaciones*.

Variaciones seculares. — La aguja de declinación ejecuta en un mismo punto del globo, al este y al oeste del meridiano astronómico, oscilaciones que duran varios siglos. Se conoce la declinación en París el año 1580: entonces era de 11°30' al *este*; fué disminuyendo hasta 1666, en que era nula, y después pasó al oeste, aumentando sin cesar hasta 1814, en que era de 22°34' al *oeste*; de entonces acá la aguja vuelve hacia el oriente. El 1° de Enero de 1893 era de 15°24'3 en el observatorio del parque de San Mauro.

Variaciones anuales. — Las variaciones anuales fueron señaladas por Cassini en 1784. El máximum de variación observado ha sido de 20 minutos. Por lo demás, estas variaciones anuales son poco conocidas y no parecen constantes.

Variaciones diurnas. — La declinación experimenta variaciones diurnas muy pequeñas que sólo es posible observar con largas agujas y por medio de instrumentos muy sensibles. En París, la amplitud media de la variación diurna es en los meses de Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre, de 13 á 15 minutos, y en los demás de 8 á 10 minutos. La amplitud de las variaciones diurnas disminuye desde los polos hacia el ecuador, donde es muy pequeña. Cerca del ecuador existe una línea sin variación diurna.

Perturbaciones. — La declinación de la aguja imantada es alterada en sus variaciones diurnas por varias causas: auroras boreales, erupciones volcánicas, caída del rayo. El efecto de las auroras boreales se deja sentir á grandes distancias. Fenómenos de esta clase que no son visibles sino en el norte de Europa actúan sobre la aguja aun en París, donde se han observado variaciones accidentales de 20 minutos. En las regiones polares, la aguja oscila á veces varios grados. La irregularidad de su marcha durante todo el día que precede á la aurora boreal es un presagio del fenómeno.

785. **Brújula de inclinación.** — La inclinación magnética en un punto dado se mide por medio de la *brújula de inclinación*.

Descripción. — Este instrumento se construye enteramente de cobre. Un primer círculo horizontal *m*, graduado y sostenido por un pie de tornillos de nivel (fig. 713), sirve de peana á la brújula propiamente dicha. Ésta consiste en un segundo círculo vertical gra-

duado M, donde se mueve una aguja imantada. El eje horizontal de la aguja está sostenido por una armadura *rd*, sobre una peana A y móvil en torno de un eje vertical. Por medio de un nivel *n* y de los tres tornillos de nivel se puede colocar horizontalmente el diámetro que pasa por entre los dos ceros del círculo M.

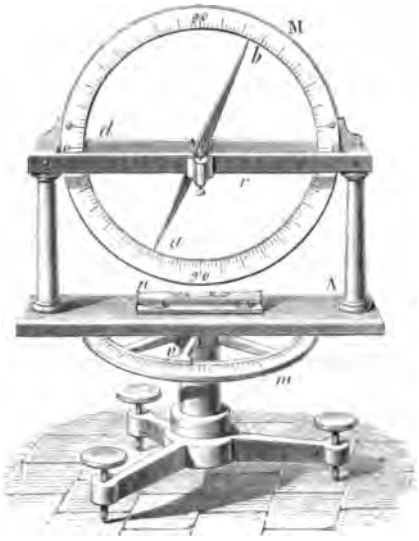


Fig. 713.

Medida de la inclinación. — Pueden utilizarse dos métodos, que se fundan ambos en las ecuaciones del § 780.

1°. *Método directo.* — El ángulo I' que forma con la horizontal la aguja de inclinación colocada en un azimut cualquiera α depende de la inclinación absoluta I, mediante la ecuación

$$\text{tang } I' = \text{tang } I \frac{1}{\cos \alpha}.$$

Obsérvase, según esta ecuación, que tang I' es proporcional al factor $\frac{1}{\cos \alpha}$. Ahora bien, éste es máximo para $\cos \alpha = 0$, quiere decir para $\alpha = 90^0$; luego tang I', y por consiguiente el ángulo I', será máximum en un azimut perpendicular al meridiano magnético; entonces se tendrá tang I' $= \infty$, é I' $= 90^0$; luego *el meridiano magnético está á 90° del azimut en que la aguja de inclinación es vertical.*

También se ve que $\frac{1}{\cos \alpha}$ es mínimum para $\cos \alpha = 1$ y $\alpha = 0^0$; pero entonces se tiene tang I' = tang I; luego *la inclinación absoluta es el ángulo más pequeño que pueda formar la aguja de inclinación.*

Operación. — Se empieza por determinar el meridiano magnético. Para ello se da vuelta al platillo A sobre el círculo *m* hasta que la aguja se ponga vertical: entonces basta con hacer girar al platillo A 90° sobre el círculo *m* para llevar el círculo vertical M al meridiano magnético. El ángulo *dca* que la aguja *ab* forma entonces con el diámetro horizontal, es igual á la inclinación.

Causas de error y Correcciones. — Aquí hay dos causas de error que precisa tener en cuenta. 1°. El eje magnético de la aguja puede no coincidir con su eje de figura; de ahí un error que se corrige por el método de inversión. 2°. El centro de gravedad de la aguja puede no coincidir con el eje de suspensión; entonces el ángulo *dca* es demasiado pequeño ó demasiado grande, según que el centro de gravedad se encuentra por encima ó por debajo del centro de suspensión; pues en el primer caso la acción de la gravedad es contraria á la del magnetismo terrestre para hacer inclinar la aguja, mientras que en el egundo es del mismo sentido. Corrígese este error invirtiendo los polos de la aguja: el ángulo de inclinación, que era demasiado pequeño, se hace demasiado grande, en idéntica

cantidad. De manera que se obtendrá la media aritmética tomando la media aritmética de las dos medidas.

2°. *Método de los azimuts rectangulares.* — *Principio.* — Si se coloca la aguja de inclinación en un azimut cualquiera α, el ángulo I' que se observa depende del ángulo I según la ecuación

$$[1] \qquad \cot I' = \cot I \cos \alpha.$$

Supongamos que se da vuelta al limbo de 90°, de manera que se le coloque en un azimut α' igual á $90^0 + \alpha$. Como se tiene $\cos \alpha' = \cos(90^0 + \alpha) = -\operatorname{sen} \alpha$, la relación entre I y el nuevo ángulo I'' será

$$[2] \qquad \cot I'' = -\cot I \operatorname{sen} \alpha.$$

Elevemos al cuadrado los dos miembros de cada ecuación y sumémoslos; tendremos

$$[3] \qquad \cot^2 I' + \cot^2 I'' = \cot^2 I (\cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha) = \cot^2 I.$$

Operación. — Efectuando dos determinaciones en azimuts rectangulares, se obtendrá la inclinación por medio de la ecuación [3], sin preocuparse de determinar previamente el meridiano magnético.

786. **Variaciones de la inclinación.** — La inclinación, lo mismo que la declinación, varía de un punto á otro, pero con arreglo á una ley más precisa. En el hemisferio norte, se inclina por debajo del horizonte el polo austral de la aguja : en las cercanías del polo norte de la tierra hay puntos donde la inclinación es de 90°; después, á partir de allí, disminuye con la latitud hasta el ecuador, donde es nula, ya sobre el círculo mismo, ya en puntos que distan poco de él. En el hemisferio austral vuelve á aparecer la inclinación, pero en sentido contrario, pues ahí el que se inclina por debajo del horizonte es el polo sud de la aguja.

Llámase *ecuador magnético* á la curva que pasa por los puntos donde la inclinación es nula, y *polos magnéticos* aquellos en que la inclinación es de 90°. Según las observaciones de Duperrey, el ecuador magnético corta al ecuador terrestre en dos puntos diametralmente opuestos, uno en el Gran Océano, el otro en el Océano Atlántico. Estos puntos parecen animados de un movimiento de translación de oriente á occidente. Cuanto á los polos magnéticos, existen dos: uno en el hemisferio boreal, cerca de la Isla Melville; el otro en el hemisferio austral, en la tierra Victoria, al oeste del volcán Erebo; pero la posición de estos puntos varía con la del ecuador magnético.

La inclinación varía también en un mismo lugar de una época á otra. En 1671 era en París de 75°. Desde entonces acá ha ido disminuyendo : el 1° de Enero de 1893 era de 65°8'5'' en el observatorio del parque de San Mauro. En los últimos veinticinco años ha disminuido por término medio 3',3'' por año.

787. **Medida de la intensidad del magnetismo terrestre.** — La acción F de la tierra sobre un polo de imán en un punto dado depende al mismo tiempo de la intensidad del campo magnético terrestre y de la masa magnética de los polos del imán.

Llamando h á la intensidad del campo magnético terrestre en un punto dado, se tiene $F = h\mu$ y *esta fuerza tiene la dirección* de la mitad Norte de la aguja de inclinación.

El momento de esta acción sobre una aguja de longitud $2l$ es, por definición, $C = 2l\mu h$ ó Mh.

Esta fórmula supone, sea que la barra tiene libertad para moverse en todas direcciones, sea que puede girar en el plano mismo del meridiano magnético. Si se trata de la aguja de declinación, el momento del par terrestre tiene por valor $Mh \cos I$ ó MH, llamando H á la componente horizontal del campo terrestre.

El método usado para medir la intensidad H del campo horizontal en un lugar dado consiste en efectuar dos experimentos sucesivos :

El primero tiene por objeto dar MH; el segundo expresa $\frac{M}{H}$.

1°. *Determinación de* MH. — Puede efectuarse sea por medio de la balanza de Coulomb, sea por el método de las oscilaciones. Este último es el más exacto.

Llamando T á la duración *observada* de la oscilación del imán por efecto de la tierra, se sabe que se tiene

$$[1] \qquad T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{MH}},$$

siendo Σmr^2 el momento de inercia calculado del imán; de esta igualdad se deduce

$$[2] \qquad MH = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \sqrt{\Sigma mr^2}$$

ó también

$$MH = 4\pi^2 N^2 . \Sigma mr^2,$$

si N es el número de las oscilaciones efectuadas por el imán en un segundo. (La fórmula [1] supone las oscilaciones de escasa amplitud).

En un experimento efectuado en Gottinga el año 1852 obtuvo Gauss por este método MH = 179 770 600, tomando como unidades fundamentales el segundo, el milímetro y la masa del miligramo.

2°. *Determinación de* $\frac{M}{H}$. — Se efectúa por el método de Gauss, cuya teoría se ha indicado precedentemente. Consiste en hacer actuar el imán que ya ha servido en el experimento precedente, sobre una pequeña aguja imantada móvil, observando su desviación α.

Colócase la barra imantada AB perpendicularmente al meridiano magnético, á cierta distancia conocida d de la aguja. Ésta puede encontrarse en dos situaciones diferentes llamadas *posiciones de Gauss*. En el caso de la figura 705 se tiene

$$\tan \alpha = \frac{M}{Hd^3}.$$

y por consiguiente

$$[3] \qquad \frac{M}{H} = d^3 \tan \alpha.$$

De las ecuaciones [2] y [3] se puede deducir H. Como se conoce la inclinación I se obtiene h por medio de la igualdad $h \cos I = H$. h sen I expresa entonces la componente vertical V del campo terrestre.

Resultados generales. — Los valores actuales de las componentes del magnetismo terrestre, deducidos de observaciones efectuadas en el Parque San Mauro en 31 de diciembre 1892, son en unidades C. G. S.:

para la componente horizontal	H = 0,19596
— vertical	V = 0,42297
para la intensidad total	h = 0,46616

788. **Momento magnético de las barras imantadas.** — Estos métodos de Gauss conducen igualmente á la determinación del momento magnético absoluto de una barra cualquiera. En efecto, sometiendo esta barra á las dos series de medidas precedentes, se obtendrá

$$[1] \qquad MH = a\frac{M}{H} = b.$$

Multiplicando estas dos ecuaciones miembro á miembro, resulta

$$M^2 = ab, \qquad \text{de donde} \qquad M = \sqrt{ab}.$$

Por ejemplo, el momento magnético de un imán de acero Clémandot, de 9,90 cm de largo y de masa de 79,518 g, está expresado en unidades C. G. S. por el número 1804.

789. **Agnja y sistema astáticos.** — Llámase *aguja astática* á una aguja imantada que se sustrae á la acción magnética de la tierra. Tal

sería una aguja móvil en torno de un eje situado en el plano del meridiano magnético paralelamente á la inclinación; pues como entonces el par magnético terrestre actúa según el eje, no puede imprimir á la aguja ningún movimiento.

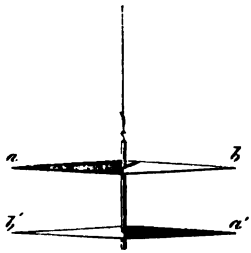


Fig. 714.

Llámase *sistema astático* al conjunto de dos agujas imantadas en el mismo grado y reunidas paralelamente, poniendo frente á frente los polos contrarios (fig. 714). Si los polos son rigurosamente de la misma intensidad, las acciones contrarias del magnetismo terrestre sobre los polos que están frente á frente se destruyen dos á dos y el sistema es *astático*.

En el *galvanómetro* se verá una aplicación importante de este sistema.

CAPÍTULO III

DISTRIBUCIÓN DEL MAGNETISMO EN LAS BARRAS IMANTADAS. PROCEDIMIENTOS DE IMANTACIÓN.

DISTRIBUCIÓN DEL MAGNETISMO.

790. **Experiencias de Coulomb.** — Un imán no tiene la propiedad magnética únicamente en sus polos: existe también, aunque en grados desiguales, en las diferentes secciones de la barra. Coulomb estudió la distribución del magnetismo en un imán por medio de dos métodos: el de la *balanza de torsión* y el de las *oscilaciones*.

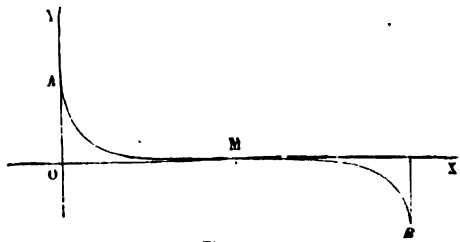


Fig. 715.

Resultados. — 1°. *Curva del magnetismo.* — Este físico imantaba *á saturación* alambres cilíndricos, de 4 milímetros de diámetro, hechos con el mismo acero y fuertemente templados. Habiendo determinado las acciones φ', φ'',... de las diferentes capas m, m', las representaba gráficamente levantando en cada punto de la barra una ordenada proporcional á la acción φ correspondiente, y por consiguiente á la *cantidad de magnetismo* que se supone concentrada en esa capa. Vese que la cantidad de magnetismo va creciendo desde un punto M, cercano al centro, donde es nula, hasta la extremidad O de la barra, donde es máximum. Á la otra mitad de la barra corresponde otra curva, idéntica á ésta, representa-

tiva del magnetismo boreal. Distínguesela de la precedente levantando ordenadas *negativas*. La curva completa del magnetismo tiene pues dos ramas simétricas respecto de la línea media de la barra (fig. 715).

Determinación de los polos. — Puede deducírsela de la curva del magnetismo de la barra considerada.

En efecto, sabemos que los polos son los puntos de aplicación de las fuerzas magnéticas paralelas, procedentes de la acción del par terrestre, en las diversas capas de la barra. Ahora bien, se demuestra fácilmente que, dada en cada extremidad la curva de las intensidades, el polo es la proyección sobre la barra del centro de gravedad de la superficie de cada curva.

Con una barra corta, las superficies limitadas por las curvas magnéticas se reducen á triángulos, y los polos coinciden con las proyecciones de los centros de gravedad de estos triángulos.

PROCEDIMIENTOS DE IMANTACIÓN.

791. **Manantiales de imantación y métodos. — Saturación.** — Los diversos manantiales de magnetismo son los imanes naturales, el magnetismo terrestre y la corriente eléctrica. Esta última es la más poderosa y la única utilizada cuando se trata de barras de gran sección. Los demás procedimientos pueden servir para las barras de pequeña sección.

Sea cual fuere el método de imantación empleado, se observa que hay un límite á la que una barra puede adquirir. Este límite depende al mismo tiempo de las dimensiones de la barra, de su grado de temple y de la intensidad del foco; cuando se le ha alcanzado, dícese que la barra está imantada *á saturación*. Si se pasa del punto de saturación, la barra no tarda en volver á él, y aun tiende á caer por debajo del mismo, si no se conserva su fuerza magnética por medio de armaduras, según pronto veremos (795).

792. **Imantación por los imanes.** — Este método se aplica por tres procedimientos clásicos : 1°. el *simple contacto ;* 2°. el *contacto separado;* 3°. el *doble contacto.*

1°. *Procedimiento del simple contacto.* — Se desliza el polo de un fuerte imán de un extremo al otro de la barra que se trata de imantar, y se repiten varias veces las fricciones, siempre en el mismo sentido : la última extremidad que toca el imán móvil presenta un polo de nombre contrario al del polo que sirve para las fricciones.

Observación. — Este procedimiento fué el primero que se empleó porque es efectivamente el más sencillo. En rigor el simple contacto de un polo de imán basta para imantar una barra de acero. Así es como se fabricaban desde el siglo XII agujas de brújula por simple contacto con piedras de imán. Pero no tardó en descubrirse que la acción del imán se acelera y se acentúa por la fricción.

Este método tiene el inconveniente de no proporcionar sino imantación débil é irregular, porque el polo del imán desarrolla un campo magnético de intensidad escasa y variable, y producir puntos consecuentes, sobre todo si la lámina que se trata de imantar es algo larga y de acero un tanto duro.

2°. *Procedimiento del contacto separado.* — Se colocan los dos polos contrarios de dos barras de igual fuerza en medio de la barra que

se trata de imantar y se les desliza simultáneamente cada uno de ellos hacia una de las puntas de la barra, manteniéndolos de manera que formen ángulos de 25° á 30° (fig. 716). Después se vuelve á llevar cada imán hacia el centro de la barra, y se repite la misma operación. Al cabo de varias fricciones semejantes en las dos caras queda imantada la barra.

Acelérase y auméntase la imantación colocando las dos extremidades de la barra que se trata de imantar sobre los polos contrarios *b* y *a'* de dos imanes fijos *ab* y *a'b'* cuya influencia se agrega á las

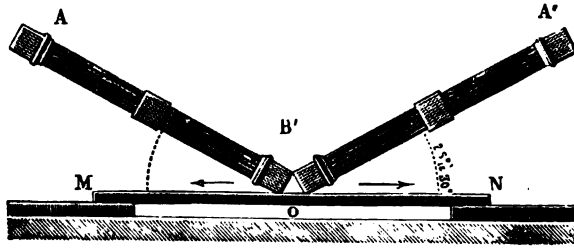


Fig. 716.

acciones de los imanes móviles AB y A'B'. La barra frotada adquiere polos M y N, de nombres contrarios á los polos B, B', A, A', de los imanes influyentes.

Este procedimiento produce la imantación más completa y más regular; así es que se le aplica de preferencia á las agujas de brújula y á las láminas delgadas cuyo grueso no pasa de 5 milímetros.

Duhamel estudió este procedimiento en 1760 y lo perfeccionó hasta el punto de que á menudo se le da su nombre. Colocaba los imanes inductores sobre la lámina y no por debajo, lo cual hace más cómoda la operación, inclinándolos sobre el horizonte.

3°. *Procedimiento del doble contacto.* — El mejor de estos antiguos procedimientos de imantacción era el de doble contacto indicado antes que nadie por Mittchell en 1751 [1].

Los dos imanes se colocan también en medio de la barra, con sus polos contrarios frente á frente; pero se les mantiene á distancia fija por medio de una traviesa no magnética dispuesta entre ellos (fig. 717). Háceseles deslizarse juntos desde el centro hasta un extremo volviendo luego de este extremo á la otra punta, de manera que cada mitad de la barra reciba el mismo número de fricciones. El campo magnético de influencia quedaba considerablemente aumentado, en el intervalo de los dos polos, por su acción simultánea.

1. En su *Treatise on artificial magnets* (Cambridge, 1751).

Æpinus perfeccionó este método en 1758 disponiendo, como en el procedimiento del contacto separado, dos gruesas barras debajo de

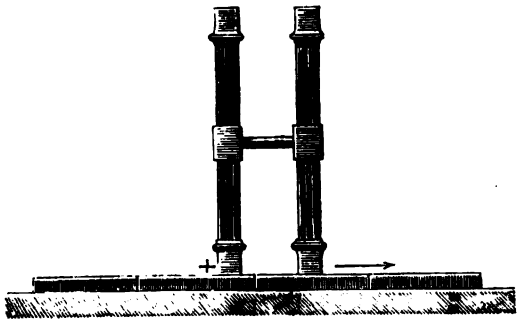


Fig. 717.

la que se quiere imantar, é inclinando las móviles un ángulo de 15 á 20 grados (fig. 718). Este procedimiento es el más enérgico de

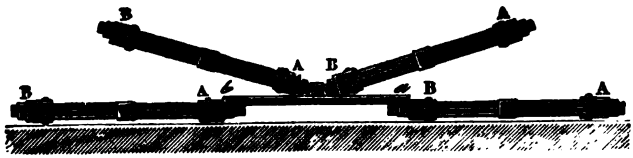


Fig. 718.

todos, y puede servir para imantar grandes barras; pero con frecuencia produce puntos consecuentes.

793. **Imantación por acción de la tierra.** — El magnetismo terrestre tiende constantemente á producir la imantación en el hierro y el acero. Así, una barra de hierro dulce, ó bien de acero sin templar, se imanta cuando se la coloca en el meridiano magnético, paralelamente á la aguja de inclinación, mientras que una de acero no templado no es influida en lo más mínimo.

Sin embargo de esta manera no se obtiene más que imantación inestable; pues si se vuelve la barra, los polos quedan invertidos inmediatamente y si se la separa del meridiano magnético, el magnetismo desaparece por completo. Sin embargo, lógrase dar al hierro dulce fuerza coercitiva sensible si, mientras está bajo la influencia de la tierra, se le somete á una acción mecánica brusca é intensa, tal como una fuerte torsión ó un martillado en frío sobre un yunque. Pero la fuerza coercitiva desarrollada de este modo es escasa y no tarda en perderse por completo, lo que no ocurre con el acero.

Observación. — Por la influencia prolongada del magnetismo terrestre se explica la formación de los imanes naturales, así como la imantación espontánea que se observa con frecuencia en los utensilios viejos y en otros objetos de acero ó de hierro, como son clavos, palas, tenazas, etc. La fundición tiene mucha fuerza coercitiva y se imanta muy bien.

794. **Imanes compuestos ó Haces magnéticos.** — Llámase *imán compuesto ó haz magnético* un conjunto de barras imantadas reunidas

paralelamente por sus polos del mismo nombre. La fuerza de un imán semejante es mucho más intensa que la de un imán de un solo trozo que tuviera dimensiones idénticas.

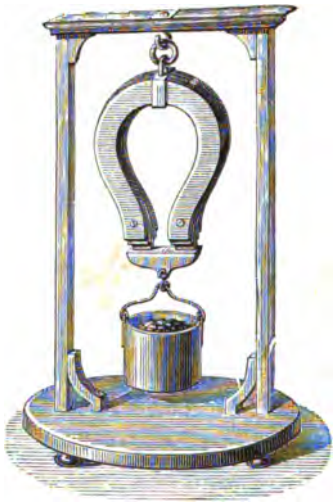


Fig. 719.

Ya se les da la forma de herradura (fig. 719 y 721), ya una rectilínea (fig. 720 y 722). El haz representado por la figura 720 está formado por 4 láminas de acero yuxtapuestas. El de la figura 719 se compone de 12 láminas dispuestas en tres capas de 4 láminas cada una. La forma de herradura es preferible para hacer que el imán sostenga un peso, pues se utilizan los dos polos al mismo tiempo. En ambas especies de haces, las láminas se templan é imantan separadamente, superponiéndolas después y reuniéndolas por medio de tornillos de hierro, ó por abrazaderas de latón.

795. **Armaduras de los imanes.** — Llámase *armaduras* á unas piezas de hierro dulce, tales como A y B (fig. 720), que se dejan constantemente en contacto con los polos de los imanes, y que tienen como resultado conservar el magnetismo y aun aumentarlo.

La figura 721 representa una piedra imán provista de sus armaduras en las caras que corresponden á los polos. Consisten en dos láminas de hierro dulce, terminada cada una de ellas por un tope macizo. Estas láminas se imantan por influencia del imán natural : los polos A y B de éste desarrollan en la armadura polos de nombres contrarios *b* y *a*. Ahora bien, una vez imantadas estas armaduras, reaccionan á su vez sobre el magnetismo del imán natural y aumentan de este modo su poder.

Fig. 720.

Fig. 721.

Los imanes naturales desprovistos de armadura son muy débiles

pero armados se vuelven capaces de sostener pesos que aumentan progresivamente hasta cierto límite, del cual no pueden pasar. Demuéstrase este hecho colgando de la armadura sea un platillo de balanza, sea un balde (fig. 770) donde se pueden agregar progresivamente pesos, hasta un punto en que se produce *desprendimiento* brusco.

Fig. 722.

Para armar los imanes artificiales se les dispone por pares (fig. 723) colocando frente á frente los polos contrarios, y después *se cierra el circuito magnético* con dos pequeñas barras de hierro dulce AB que conservan el imán, impidiendo que sus líneas de fuerza se pierdan en el espacio ambiente. Cuanto á las agujas móviles, como están sometidas de manera permanente á la acción directora del magnetismo terrestre, esto les sirve de armadura.

Observación. — *Contactos.* — Los imanes no actúan directamente por sus armaduras, sino por medio de otra pieza de hierro dulce, llamada *contacto* (fig. 719, 721 y 723). El contacto *a'b'* (fig. 722), que es de hierro dulce, hace á su vez oficios de segunda armadura, pues se imanta por influencia y sus polos *a'* y *b'* reaccionan sobre los polos *a* y *b* de la primera.

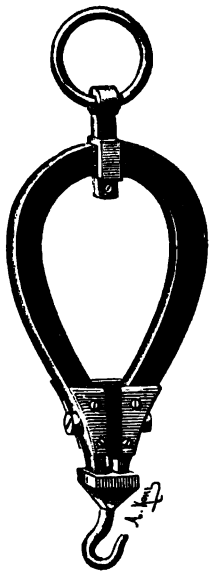


Fig. 723.

796. **Fuerza portátil de los imanes.** — La imantación resultante de un imán se estima por su *fuerza portátil*, quiere decir, por el peso que puede sostener.

La fuerza portátil de un imán, de sustancia y peso dados, se aumenta por la adición de un contacto. El aumento crece durante cierto tiempo hasta un límite dado, y después se anula bruscamente desde que el contacto desaparece. En este caso se produce una especie de condensación de magnetismo análogo á la que luego estudiaremos para las cargas eléctricas. La fuerza portátil disminuye después de este primer arranque y se mantiene á un valor mininum constante. Así se ve que el imán Jamin,[1] que sostenía hasta 800 kilogramos antes del primer arranque, no carga normalmente sino 500 después de él.

Fórmula de Bernoulli. — La fuerza portátil de los antiguos imanes se determi-

1. Este imán, que figuraba en la Exposición universal de 1867, se conserva en el Laboratorio de investigaciones físicas de la Sorbona.

naba de manera aproximada por una fórmula de Bernoulli. Llamando P el peso del imán, y a una constante característica de la sustancia, se tiene

$$E = a\sqrt[3]{p^2}.$$

797. **Imanes Jamin.** — Jamin fué conducido por sus trabajos sobre la distribución del magnetismo en las barras imantadas á importantes resultados relativamente á su *límite de saturación*, á la influencia de sus armaduras y de sus contactos y á su *fuerza portátil*.

1°. Primero comprobó que el límite de saturación de un haz magnético era alejado considerablemente por el influjo de las armaduras que se adaptan á él.

Así, un haz magnético de 3 placas no sostenía sino 4 kilogramos próximamente cuando estaba desprovisto de armaduras y hasta 140 kilogramos cuando llevaba dos armaduras de 350 centímetros cuadrados.

2°. La fuerza portátil de una lámina aumenta con su grueso, pero menos rápidamente que la proporcionalidad. Así es que sustituyó á las láminas gruesas de acero que se usan para construir los haces magnéticos, otras láminas muy delgadas, que se imantan á saturación y se sobreponen en número suficiente.

La figura 723 representa un imán de forma de herradura construido según las indicaciones de Jamin. Consiste en un haz de láminas de acero muy encorvadas y provistas de armaduras de hierro dulce: éstas se encuentran separadas por una pieza de latón y sólidamente sujetas entre sí y con las láminas.

Estos imanes se formaron, lámina por lámina, por medio del procedimiento eléctrico descubierto por Arago.

3°. *Fuerza portátil.* — Su fuerza portátil es muy superior á la que se podría deducir de la aplicación de la fórmula de Bernoulli. Así para el imán grande de Jamin, no se obtendría sino F = 260 kilogramos (mientras que la fuerza medida era de 800), aún adoptando para la constante a el valor 19,5 (característico de los aceros de Harlem), que los aceros utilizados por Bernoulli estaban muy lejos de alcanzar.

LIBRO X

ELECTRICIDAD ESTÁTICA[1]

CAPÍTULO PRIMERO

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.

798. **Definiciones. — Historia.** — Hay gran número de sustancias que al ser frotadas con un pedazo de paño ó una piel de gato adquieren la propiedad de atraer los cuerpos ligeros, tales como las barbas de pluma, pedacitos de paja, etc. Esta propiedad, que al principio se descubrió respecto del ámbar amarillo, fué observada más adelante en el lacre, las resinas, la gutapercha, el azufre, el vidrio, la seda, la ebonita (goma elástica endurecida), la parafina, la seda artificial, que se electriza fuertemente cuando se la frota con la mano.

Puede servir para definir la electricidad. Los cuerpos que adquieren dicha propiedad están *electrizados*, y la causa desconocida de ese fenómeno, denominado *eléctrico*, se llama *electricidad*.

Las principales causas que desarrollan la electrización son el contacto ya simple, ya reforzado por el frotamiento ó la presion, las acciones químicas, el calor, el magnetismo y la misma electricidad. Sus efectos principales son atracciones y repulsiones, fenómenos luminosos ó caloríficos, conmociones más ó menos violentas y reacciones químicas.

Observaciones. — 1°. *Frotamiento de los líquidos y de los gases.* — También un cuerpo sólido puede electrizarse cuando se le frota con un líquido ó un gas. Basta introducir una varita de vidrio en mercurio para electrizarlo. Análogamente, en el vacío barométrico, el movimiento del mercurio electriza el vidrio; un tubo vacío de aire, donde se encierran algunos glóbulos de mercurio, se pone luminoso en la oscuridad si se le sacude. Cuanto á los gases, Wilson descubrió que dirigiendo una corriente de aire sobre una turmalina, un pedazo de vidrio ó resina, estas sustancias se electrizaban; pero Faraday observó más tarde que

1. En los libros X y XI, que constituyen un tratado compendiado de Electricidad, se hallarán las nuevas experiencias más elementales del Curso de Electricidad explicado por M. G. Lippmann en la Sorbona durante el año 1893. Los datos relativos á ellos, tanto experimentales como teóricos, nos ha sido suministrados con gran amabilidad por MM. Cl. Limb y A. Guillet, preparadores de dicho curso.

sólo se produce efecto eléctrico si el aire está húmedo ó mantiene en suspensión polvos secos.

2ª. *Historia.* — Tales de Mileto observó, 600 años ya antes de J. C., la propiedad que el ámbar frotado adquiere de atraer los cuerpos ligeros. Sólo á fines del siglo XVI hizo ver Gilbert que otras muchas sustancias pueden adquirir también la propiedad atractiva por el frotamiento. Una vez dado el impulso, los descubrimientos se sucedieron de manera continua. Los expondremos en su orden cronológico, que concuerda perfectamente con el orden lógico de los principios fundamentales de esta ciencia.

799. **Electroscopios.** — Reconócese que un cuerpo está electrizado por medio de pequeños instrumentos llamados *electroscopios*, entre los

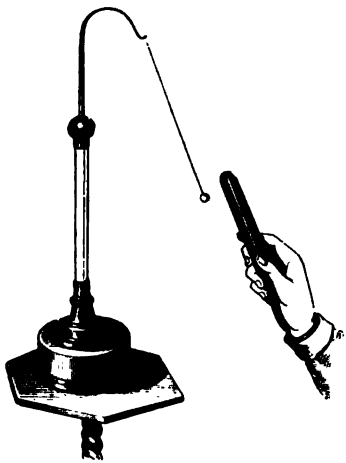


Fig. 724.

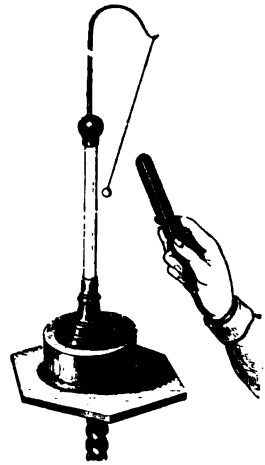


Fig. 725.

cuales puede citarse como más sencillo el *péndulo eléctrico* (fig. 724). Consiste en una pequeña bola de médula de saúco, suspendida por un hilo de seda de un soporte con un pie de vidrio. El carácter de la *electrización* es que, cuando se acerca un cuerpo electrizado, la pequeña bola empieza por ser *atraída* (fig. 724), y *rechazada* así que ha habido contacto (fig. 725).

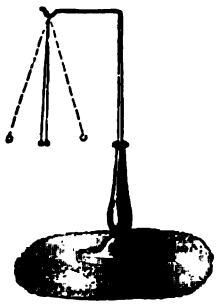


Fig. 726.

También se utiliza el *doble péndulo eléctrico*, formado, sea por dos bolas distintas, que cuelgan de dos hilos de seda (fig. 726) de un mismo soporte, sea por dos hojas de oro E, suspendidas de la extremidad inferior de un vástago metálico terminado en lo alto por un botón metálico (fig. 729) : por ahí es por donde se pone en comunicación el cuerpo electrizado con el electroscopio, por medio de un alambre metálico largo y fino, ó bien por contacto

directo. Las hojas de oro divergen si el cuerpo está electrizado.

Observación. — Si la bola de saúco de un electroscopio no debe conservar su carga después del alejamiento del cuerpo electrizado, es preferible no aislarlo.

800. **Conductibilidad eléctrica.** — Cuando se presenta al péndulo eléctrico una barra de lacre frotada por una punta, se observa que no atrae más que por él; la otra punta, que no ha sido frotada, no da señales ningunas de electrización. Lo mismo pasa con un tubo de vidrio ó una barra de azufre mientras no se les ha frotado en toda su longitud. Por el contrario, la experiencia prueba que apenas ha adquirido un cuerpo metálico, dentro de ciertas condiciones, la propiedad eléctrica en uno de sus puntos, ésta se propaga instantáneamente por toda la superficie del cuerpo, sea cual fuere su dimensión.

Hay pues sustancias que transmiten la propiedad eléctrica y otras que la conservan fija en los puntos directamente electrizados.

Experiencias de Gray. — Este hecho fué descubierto por Gray en 1727. Dicho físico observó primeramente que si se frota un tubo de vidrio hueco cerrado por un tapón de corcho, éste adquiere la propiedad eléctrica, por más que fuera incapaz de adquirirla cuando se le frotaba directamente, pero manteniéndolo en la mano. Después generalizó este hecho por medio de un experimento célebre. Ató al tapón una cuerda de cáñamo cuya longitud era de 765 pies y la tendió horizontalmente suspendiéndola por medio de cintas del techo de la sala. Cada vez que se frotaba el tubo de vidrio, se observaba que la acción eléctrica se ejercía en toda la extensión de la cuerda.

801. **Cuerpos buenos conductores y cuerpos malos conductores.** — Dícese que los cuerpos, por ejemplo los metales, que transmiten la propiedad eléctrica, *conducen bien la electricidad*, ó que son cuerpos *buenos conductores*, y que los otros conducen mal la electricidad, ó que son cuerpos *malos conductores* ó *aisladores*.

Esta clasificación de los cuerpos no debe considerarse como absoluta. No los hay que sean *perfectamente conductores*, quiere decir, que transporten la electricidad á toda distancia é instantáneamente ni cuerpos *absolutamente aisladores*, esto es, que opongan resistencia completa á la propagación de la electricidad. En realidad, los cuerpos son *más ó menos* conductores, y *más ó menos* aisladores. Por otra parte, el grado de conductibilidad para una misma sustancia, depende de su temperatura y de su estado físico. El vidrio, que es muy mal conductor á la temperatura ordinaria, conduce bastante bien cuando se le calienta hasta la temperatura del rojo. Análogamente, la goma laca y el azufre se vuelven buenos conductores cuando se les calienta.

Cuerpos idioeléctricos y aneléctricos. — La gran conductibilidad de los metales es lo que hace que no se pueda electrizarlos directamente, á menos que no se tenga cuidado de aislarlos previamente y frotarlos con un cuerpo no conductor. En estas condiciones, los metales se electrizan tan bien como los cuerpos malos conductores. Para demostrarlo, se fija un tubo de latón en un mango de vidrio

ó de parafina (fig. 727), y, manteniendo este último en la mano, se frota el metal con un pedazo de seda ó de tafetán engomado; acercándolo luego á un electroscopio, se observa que está electrizado. Si se mantuviera directamente el metal en la mano, no se vería el menor rastro de electrización: sin embargo, aun habría producción de electricidad por frotamiento, pero se perdería desde luego en el suelo.

Fig. 727.

Este hecho general explica la antigua clasificación de los cuerpos, hecha por Gilbert, quien los dividió en *idioeléctricos*, quiere decir que pueden electrizarse (eran los cuerpos aisladores), y en *aneléctricos*, quiere decir, incapaces de electrizarse (eran los cuerpos conductores).

802. **Aisladores, depósito común.** — Los cuerpos malos conductores sirven de *aisladores*, quiere decir de soportes destinados á conservar á los cuerpos conductores su electricidad, *aislándolos* del suelo. Como la tierra está formada de sustancias más ó menos buenas conductoras, así que un cuerpo conductor electrizado comunica con ella por medio de otro conductor, la electricidad se pierde en su seno inmediatamente; en otros términos, la electricidad que cargaba primitivamente el conductor, carga, después de establecida la comunicación, el conductor mucho más grande que forman el cuerpo y la Tierra. De manera que se aislará un cuerpo, sea poniéndolo sobre peanas de vidrio, sea colgándolo de cordones de seda, ó bien colocándolo encima de una torta de resina, ó mejor aún de parafina muy limpia[1]. Sin embargo, no existen *aisladores perfectos;* los cuerpos peores conductores no aislan nunca completamente, y todo cuerpo electrizado pierde siempre más ó menos lentamente su electricidad por los soportes.

No hay que preocuparse del vapor de agua mientras está en el aire. M. Boudréaux ha demostrado efectivamente que la pérdida es ocasionada, no por el vapor atmosférico, sino por el agua condensada en la superficie de los sostenes de vidrio[2].

803. **Distinción de dos electricidades.** — Existen *dos modos diferentes de electrización*, ó, según se dice, *dos especies de electricidades:* los cuerpos *se rechazan* ó *se atraen*, según que están cargados de la *misma electricidad* ó de *electricidades diferentes*.

Cuando se presenta al péndulo eléctrico una barra de vidrio frotado con un pedazo de paño, hay primero *atracción*, y después del contacto *repulsión*. Como los mismos efectos se producen con una barra de lacre frotado de idéntico modo, parece que la electricidad

1. M. D. Hurmuzescu ha propuesto recientemente un aislador nuevo constituído por una especie de combinación de azufre y de parafina: éste une al poder aislador de la parafina la ventaja de ser bastante duro para que pueda ser trabajado en el torno. (*Laboratoire des recherches physiques.*)

2. *Experiencia de M. Hurmuzescu.* — Un electroscopio de hojas de oro cuyo botón metálico estaba incrustado en el aislador de M. Hurmuzescu, permaneció cargado *meses enteros* en una atmósfera que sin embargo era *saturada de vapor* por la presencia de una capa de agua sobre el platillo-sostén del aparato.

desarrollada sobre el vidrio debe ser idéntica á la de la resina. Pero si mientras que el péndulo eléctrico es rechazado por el vidrio electrizado se acerca á él la resina frotada, ésta atrae vivamente la bola de saúco; análogamente, si se presenta el vidrio frotado al péndulo rechazado por la resina electrizada, se observa fuerte atracción: luego *un cuerpo rechazado por la electricidad del vidrio es atraído por la electricidad de la resina;* y recíprocamente, *un cuerpo rechazado por la electricidad de la resina es atraído por la del vidrio.*

Dufay [1], que descubrió este hecho en 1734, lo explicó admitiendo que estos dos cuerpos se encuentran en *dos estados eléctricos diferentes*, es decir que hay *dos modos de electrización distintos*, ó también que existen *dos especies de electricidad:* una que se desarrolla en el vidrio cuando se le frota con lana, otra que se desarrolla en la resina ó el lacre cuando se les frota con un pedazo de paño ó una piel de gato. La primera se llama *electricidad vítrea*, y la segunda *electricidad resinosa.*

804. **Producción simultánea de las dos electricidades.** — Cuando se trata de producir electricidad frotando dos cuerpos uno contra otro, nada distingue á priori el cuerpo que frota del frotado; por esto es lógico admitir que si uno se electriza, el otro se electrizará al mismo tiempo. Así lo ha probado la experiencia.

El *frotamiento* ó el *simple contacto desarrolla siempre simultáneamente y en cantidades iguales las dos electricidades, una en el cuerpo frotador y otra en el frotado.*

He aquí cómo prueba este hecho M. Lippmann.

En una probeta de pie, aislada sobre un pedazo de parafina P (fig. 728) hay mercurio perfectamente seco M, que comunica, por medio de un vástago de hierro *t* y de un alambre metálico, con el botón de un electroscopio E cuya tapadera metálica se ha retirado. Si se introduce una varilla de vidrio V en el mercurio, las hojas del electroscopio permanecen en contacto; pero se separan en seguida que se empieza á retirar la varilla, y van divergiendo cada vez más hasta que la varilla queda

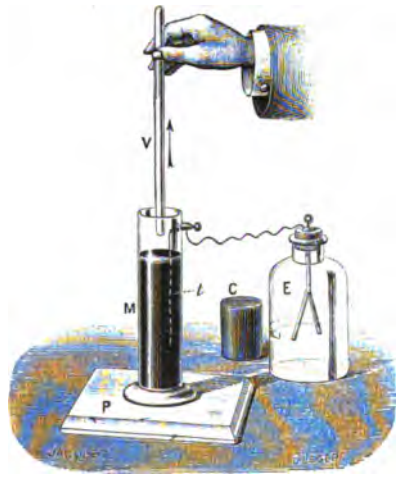


Fig. 728.

1. Miembro de la Academia de Ciencias.

enteramente fuera. Con el péndulo eléctrico ó el electroscopio se puede demostrar que vidrio y mercurio han adquirido por contacto electrizaciones opuestas.

805. **Electrización por frotamiento.** — Este hecho pone en claro el fenómeno de la electrización por frotamiento. La electricidad que se desarrolla en los cuerpos frotados depende de la naturaleza de cada uno de ellos. Así, el vidrio pulimentado, frotado con lana, se carga de electricidad *vítrea*, y la resina, frotada del mismo modo, se carga de electricidad *resinosa*. Inversamente, la lana frotada adquiere en el primer caso la *electricidad resinosa* y en el segundo la *vítrea*.

La ley que determina la repartición de las dos electricidades sobre los dos cuerpos que están en contacto es sumamente compleja. La experiencia prueba que este fenómeno depende de multitud de circunstancias que parecen insignificantes, tales como el grado de pulimento, el sentido de las fricciones y la temperatura. Por ejemplo, si se frotan uno contra otro dos platillos de vidrio *desigualmente pulimentados*, el de superficie que lo está más adquiere electricidad vítrea, mientras que el otro adquiere la electricidad resinosa. Si se frotan en cruz, una sobre otra, dos cintas de seda blanca cortadas en la misma pieza, el pedazo que se frota de través toma la electricidad vítrea, y el otro la resinosa.

Vese, pues, que las denominaciones de electricidad vítrea y de electricidad resinosa no corresponden á nada real, puesto que el vidrio puede cargarse de electricidad resinosa y la resina de electricidad vítrea. Desde ahora podemos reemplazarlos por los nombres de electricidad *positiva*, que corresponde á la primera, y de electricidad *negativa*, correspondiente á la segunda.

806. **Equivalencia de las electricidades contrarias desarrolladas simultáneamente.** — Cuando se reunen por un contacto íntimo dos cuerpos que se habían cargado por su frotamiento recíproco de electricidades contrarias, se observa que su conjunto no produce ni atracción, ni repulsión, ni ningún otro efecto. Por consiguiente, *las dos electricidades desarrolladas en dos cuerpos frotados están en proporción tal que, cuando se les reune, sus efectos se anulan mutuamente.*

En efecto, si en el experimento precedente (fig. 728), se vuelve á introduir en el mercurio la varita de vidrio, las hojas del electroscopio vuelven al contacto.

De ahí se puede por tanto deducir que las cargas desarrolladas por el frotamiento en dos cuerpos que están en contacto *son iguales*, ó por lo menos *equivalentes*, puesto que no son idénticas. Esta experiencia prueba, con independencia de toda teoría, los nombres de *positiva* y de *negativa* adoptados para designar dos cargas eléctricas cuya *suma* parece igual á *cero*: esto es lo que con frecuencia se llama una *capa doble*.

807. **Influencia eléctrica.** — Un platillo metálico P, montado en una columna de parafina V (fig. 729), se encuentra en comunicación

con un electroscopio E situado á gran distancia. Apenas se acerca á P un cuerpo electrizado S obsérvase la divergencia de las hojas de oro del electroscopio.

Luego un cuerpo electrizado es capaz de electrizar á otro desde cierta distancia. Este es el fenómeno de la *influencia eléctrica*, que será estudiado con detalle más adelante.

Fig. 729.

Se da el nombre de *inductor*, ó mejor dicho, de *cuerpo influyente* al cuerpo S primitivamente electrizado; el platillo P es el cuerpo *inducido* ó *influenciado*.

808. **Teoría de la electrización.** — Todos los hechos precedentes son puramente experimentales é independientes de toda especie de teoría. Se han propuesto numerosas hipótesis para explicarlos: sólo dos subsisten todavía en la ciencia, la de Franklin y la de Symmer.

1°. *Hipótesis de Franklin.* — Franklin admitió como causa de la electricidad un fluido único, imponderable, que actúa por repulsión sobre sus propias moléculas, y por atracción sobre las de la materia. Todos los cuerpos contienen *en estado neutro* una cantidad determinada de este fluido: si ésta aumenta, los cuerpos son electrizados *positivamente;* si disminuye, lo son *negativamente.* (Tal es el origen de las expresiones *positiva* y *negativa* que hemos usado antes en sustitución de los calificativos vagos é impropios de *vítrea* y de *resinosa*). La electricidad positiva se representa por el signo + y la negativa por —. Esta denominación y esta notación se justifican por el hecho de que añadiendo $+a$ á $-a$ se tiene cero, lo mismo que en álgebra; análogamente, dando á un cuerpo que ya tiene cierta cantidad de electricidad positiva una igual de electricidad negativa, se le vuelve al estado neutro.

2°. *Hipótesis de Symmer.* — Como la teoría de Franklin fué la primera completa que se dió sobre la botella de Leyden (851), y como esa teoría se fundaba en la hipótesis de un solo fluido, éste obtuvo desde luego la aceptación de los físicos y del mismo Dufay. Sin embargo, se le hicieron objeciones muy fundadas, sobre todo por Æpinus, y entonces el físico inglés Symmer propuso la hipótesis de dos fluidos eléctricos que actúan cada uno por repulsión sobre sí mismo y por atracción sobre el otro. Estos fluidos existen en canti-

dad indeterminada en todos los cuerpos, combinados uno con otro, formando lo que se llama *fluido neutro* ó natural. Diferentes causas, el contacto, el frotamiento, las acciones químicas, etc., pueden separarlos y entonces es cuando aparecen los fenómenos eléctricos; pero estos fluidos tienen gran tendencia á reunirse para formar de nuevo fluido neutro. Symmer dió á los dos fluidos eléctricos los nombres de *fluido vítreo* y de *fluido resinoso*, correspondientes á los dos modos de electrización descubiertos por Dufay.

Observación. — Ninguna de estas hipótesis es suficiente para enlazar y coordenar enteramente los innumerables descubrimientos de la electricidad moderna. Por lo demás, los fluidos eléctricos, como todos los restantes de los antiguos físicos, desaparecen ante la hipótesis moderna de la unidad de los agentes físicos y la teoría mecánica de los fenómenos naturales. Sin embargo, no obstante su insuficiencia, la hipótesis de Symmer es cómoda para la interpretación elemental de los fenómenos, y aun para su explicación matemática. Conservaremos pues, en la exposición de los fenómenos eléctricos, las expresiones de electricidad *positiva* y de electricidad *negativa*, con tal de no atribuirles la cualidad primitiva de *fluidos*, sino el sentido experimental de estados particulares de la materia que son sensibles y mensurables por sus efectos[1].

CAPÍTULO II

MEDIDA DE LAS FUERZAS ELÉCTRICAS. — LEYES DE COULOMB.

809. Leyes de las atracciones y de las repulsiones eléctricas. — Las acciones mutuas entre los cuerpos electrizados, de pequeñas dimensiones respecto de la distancia que les separa, están sometidas á las dos leyes siguientes, conocidas por el nombre de *leyes de Coulomb*.

1°. Ley de las distancias. — *Las repulsiones y las atracciones que se ejercen entre dos cuerpos electrizados, varían en razón inversa del cuadrado de su distancia.*

2°. Ley de las masas. — *Dada igual distancia, estas mismas fuerzas son proporcionales al producto de las masas eléctricas (es decir de las cantidades de electricidad) difundidas por los dos cuerpos.*

810. **Demostración experimental de las leyes de Coulomb.** — Estas dos leyes fueron descubiertas por Coulomb, que las demostró por dos métodos: 1°. el de la balanza de torsión; 2°. el de las oscilaciones. Como estas leyes son fundamentales

1. Se pueden consultar con fruto, en lo relativo á estos principios fundamentales, dos lecciones del curso de M. Mascart, redactadas por M. Berson y publicadas por la *Revista científica* (4 Febrero y 13 Mayo de 1882).

en electricidad, vamos á indicar su demostración por la balanza de torsión.

1°. *Descripción de la balanza.* — El aparato está contenido en una urna cilíndrica de vidrio de 35 cm de diámetro (fig. 730), en cuyo contorno se pega una banda de papel que tiene una graduación dividida en 360 grados. La urna está cerrada por un platillo de vidrio A, en cuyo centro se eleva un tubo *d* de la misma materia. Este tubo no se encuentra fijo invariablemente en el platillo, sino que puede dar vueltas con libertad sobre sí mismo. En su parte superior hay una armadura de latón formada de dos piezas (fig. 731), una *b* fija en el tubo, la otra *k* que penetra en la primera por medio de una disminución de diámetro, á fin de que sea posible darle vueltas á voluntad por medio del botón *t*. La pieza *k* es un pequeño *tambor* cuya base superior sostiene un cuadrante *e*, dividido en 360 grados, que se llama el *micrómetro*. A la pieza *b* se adapta un indicador *a*, que sirve de punto de referencia para medir la rotación del cuadrante y en consecuencia la del tambor. En el centro de éste, y debajo del botón *t* está atado un alambre de plata muy fino, que sostiene una aguja de goma laca *p*, terminada en un extremo por una pequeña bola *n*. Finalmente, el platillo de vidrio está taladrado por un agujero *r* á través del cual se puede introducir en la urna un vástago de vidrio *i*, que sirve de aislador á una bola de latón *m*.

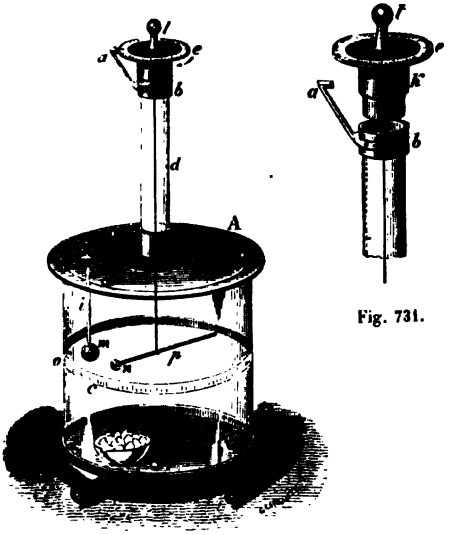


Fig. 731.

Fig. 730.

2°. *Principio del método.* — El método de medida se funda en una de las leyes de la torsión, — previamente determinadas por Coulomb : *Las reacciones mecánicas producidas por la torsión en un alambre metálico se reducen á un par cuyo momento es proporcional al ángulo de torsión del alambre.*

Este par se llama *par de torsión* y el valor de su momento, para un ángulo de separación igual á la unidad, es el *coeficiente de torsión* del alambre.

El alambre de plata de que se servía Coulomb tenía 0,035 mm de diámetro. Su coeficiente de torsión era igual á 0,269 (siendo la unidad de fuerza el miligramo y la de longitud el centímetro) : 0,269 mmg era pues la fuerza que, aplicada á un brazo de palanca igual á 1 cm, torcía el alambre un ángulo igual á la unidad trigonométrica. Ahora bien, como la aguja de Coulomb tenía 10,8 cm de largo, para torcer un grado el alambre de la balanza, bastaba aplicar en la extremidad una fuerza igual á 0,000438 mmg.

3°. *Arreglo del instrumento.* — Retírase la bola fija, después de haberla colocado enfrente del cero (dando vuelta á la tapadera superior).

Llévase la marca del tambor frente al 0° de la graduación de la urna, después de haber puesto el 0° del tambor encima de la línea de referencia. La aguja se coloca delante del 0° de la urna. Dase vuelta á la pinza, de modo que la bola de saúco se fije frente al 0°, *sin torsión*.

Cuando se vuelve á colocar la bola fija, mueve un tanto la bola de saúco.

Una vez arreglada la balanza, todos los ceros se encuentran en un mismo plano vertical que contiene la aguja de goma laca y el alambre (sin torsión) (fig. 732).

4°. *Demostración de la ley de las repulsiones.* — Introdúcese la bola fija, *electri-*

zada. Ésta empieza por electrizar, rechazándola después, á la bola móvil hasta A_1, á una distancia angular α. Entonces el hilo experimenta una torsión igual á α, de donde resulta una fuerza antagónica que equilibra la fuerza repulsiva (fig. 732). Esta es la primera experiencia. — Entonces se da vuelta al tambor superior, *en sentido inverso de la desviación*, de modo que el ángulo de separación disminuya, reduciéndose al valor α'. Supongamos que para esto haya sido necesario dar vuelta al micrómetro un ángulo N'. En este momento, el ángulo de torsión ya no es α, sino $N' + \alpha'$, y por consiguiente el momento de torsión es $c\,(N' + \alpha')$. Esto constituye un segundo experimento. Se efectuará un tercero reduciendo la separación del mismo modo hasta el valor α''. Para ello habrá que dar vuelta al micrómetro un ángulo N''; la nueva torsión será $(N'' + \alpha'')$ y su momento será $c\,(N'' + \alpha'')$.

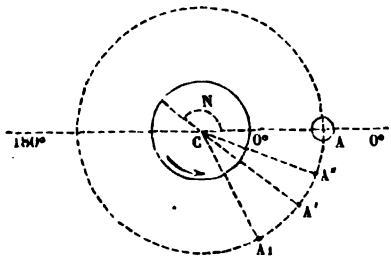


Fig. 732.

5°. *Resultados numéricos de Coulomb.* — El ángulo de repulsión inicial de las dos bolas fué 36° : el ángulo de torsión era igual á 36°. Después el ángulo de separación se redujo á $\frac{1}{2}$ 36° : hubo que dar 126° vueltas al tambor. El ángulo de torsión era pues $126 + 18 = 144°$. Luego la separación se redujo á 9° por una rotación de 567°, á partir del 0°. (En realidad era 8°30' en vez de 9°.) Luego el ángulo de torsión era $(567 + 9°) = 567°$. Estos son los únicos números publicados por Coulomb.

He aquí cómo los aplicaba á la demostración de sus leyes. Primero contaba las distancias, no sobre las cuerdas de los arcos sino sobre los arcos mismos. De consiguiente, estas distancias estaban representadas por los números 36, 18 y 9.

Cuanto á las fuerzas repulsivas, las representaba por los números mismos que expresan las torsiones sucesivas. Se ve que en estas condiciones los números anteriores demuestran la ley puesto que cuando las distancias son

$$36 \ldots 18 \quad \text{ó} \quad \frac{1}{2}36 \quad \text{ó} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{4}36,$$

las fuerzas repulsivas pasan á ser

$$36 \ldots 144 \text{ ó } 2^2 \times 36 \ldots 576 \text{ ó } 4^2 \times 36.$$

6°. *Discusión de las experiencias de Coulomb.* — Es posible darse cuenta de la legitimidad de las aproximaciones de Coulomb aplicando á sus números una comprobación rigurosa.

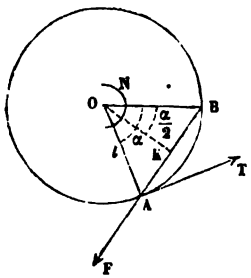


Fig. 733.

Sean B la bola fija, A la bola móvil. No consideramos más que los centros de las dos bolas, lo cual equivale á suponer que las masas eléctricas de estas bolas están condensadas en sus centros. Más adelante veremos (833,5°) que esta hipótesis es legítima. Así procedía Coulomb. Colocaba la vista en el plano vertical definido por la aguja y por el centro de cada bola, y tomaba nota del azimut de este plano (fig. 733).

Sean α el ángulo de separación y $(N + \alpha)$ la torsión total.

El equilibrio de la aguja puede ser asimilado al de un cuerpo sólido móvil alrededor de un eje fijo vertical (se admite que las componentes de las fuerzas eléctricas dirigidas según el radio OA son incapaces de apartar el alambre de su posición vertical). Las fuerzas que se equilibran son F y el par de torsión : *la suma de sus momentos*

(respecto del eje de rotación O) *debe en consecuencia ser nula.* Pero se tiene

$$\text{Momento de } F = F.\,OK = F.\,l \cos \frac{\alpha}{2},$$

$$\text{Momento del par de torsión} = c\,(N + \alpha).$$

La ecuación de equilibrio es pues

$$1] \qquad F.\,l \cos \frac{\alpha}{2} = c\,(N + \alpha).$$

Si admitimos la ley de Coulomb, tenemos, llamando f la acción á la unidad de distancia (y haciendo $d = AB$),

$$2] \quad F = \frac{f}{d^2} = \frac{f}{4\,l^2 \operatorname{sen}^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \text{de donde} \quad 3] \quad \frac{f}{4\,lc} = (N + \alpha) \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2}.$$

Apliquemos á esta ecuación los resultados numéricos de Coulomb. Como f es invariable para una misma carga inicial de las dos bolas, el segundo miembro de la ecuación debe ser constante, é igualando entre sí los primeros miembros resulta

$$36 \operatorname{sen} 18^\circ \operatorname{tang} 18^\circ = (126 + 18) \operatorname{sen} 9^\circ \operatorname{tang} 9^\circ = (567 + 9) \operatorname{sen} 45^\circ \operatorname{tang} 45^\circ$$

Efectuando el cálculo, se obtienen las números 3, 614, 3, 568 y 3, 169, que son *sensiblemente* constantes.

Observación. — Desde la época de Coulomb se han efectuado muchas experiencias de comprobación; pero ninguna serie presenta números más aproximados que los de dicho físico, á pesar de las precauciones adoptadas por los diversos experimentadores para evitar las causas de error, á saber: *La pérdida de la electricidad de las bolas por el aire y los soportes; la influencia recíproca de las masas eléctricas difundidas por las dos bolas ó producidas por inducción en los órganos de la balanza.* En fin, los *errores de lectura.*

811. **Demostración de la ley de las masas.** — Coulomb *admitía a priori*, por razón de simetría, que dos esferas iguales, una de ellas electrizada y la otra en estado neutro, toman cargas iguales cuando se las pone en contacto. Además admitía la *invariabilidad de la carga inicial.*

Introducía una bola fija electrizada, que por contacto electrizaba á la bola móvil. Esta se encontraba primeramente en el grado 0^0 sin torsión. Era rechazada hasta cierta distancia. Coulomb reducía la separación á α^0 $(= 2^0)$, gracias á una torsión del micrómetro superior y entonces tocaba á la bola con otra igual. — La repulsión disminuía, puesto que la carga de la bola fija se había hecho una mitad más pequeña. Para mantener la bola móvil á la distancia α, se necesitaba pues una torsión menor. Coulomb daba vuelta al micrómetro en sentido inverso de modo que se redujera la torsión total á $N' + \alpha$ y se observaba que

$$N' + \alpha = \frac{N + \alpha}{2}.$$

Puede efectuarse otra experiencia tocando de nuevo la bola fija lectrizada con una bola igual y neutra, y reduciendo la separación al mismo valor α: obsérvase que la nueva torsión

$$N'' + \alpha = \frac{N + \alpha}{4},$$

lo mismo que la carga, se ha reducido *á la cuarta parte* de la carga inicial.

812. **Ley elemental de las acciones eléctricas.** — De las experiencias de Coulomb resulta que dos pequeñas esferas electrizadas A y

A' se atraen ó se rechazan en razón inversa del cuadrado de su distancia y en razón directa del producto de sus cargas.

La ley de las distancias no se verifica sino en tanto que la distancia de los centros de las esferas permanece siendo siempre muy grande respecto de sus radios. La Tierra y el Sol no son más que puntos si se los compara con la distancia que los separa. Si se supone que permaneciendo constantes las cargas de las dos esferas disminuyen cada vez más sus radios, la ley sigue aplicándose á distancias cada vez más reducidas. De ahí se puede inducir que la ley sería verdadera aun *en el límite*, quiere decir, respecto de *puntos electrizados* situados, á una distancia r infinitamente pequeña. Esto se expresa diciendo que la *ley de Coulomb* es la *ley elemental* de las acciones eléctricas.

813. **Expresión matemática de la ley de Coulomb. — Unidad de cantidad de electricidad ó Unidad de carga eléctrica. — Coulomb.** — Si se llama φ la acción que ejerce una masa eléctrica igual á la unidad sobre otra masa eléctrica igual situada á la unidad de distancia, la acción f, ejercida á la distancia d, por una masa q, sobre otra q', estará dada evidentemente por la fórmula

$$[1] \qquad f = \varphi \cdot \frac{qq'}{d^2}.$$

Si las dos masas son del mismo signo, la fuerza es *positiva*, y consiste en una *repulsión*; en el caso de una atracción es *negativa*.

Si $\quad q' = q, \quad f = \varphi \frac{q^2}{d^2}, \quad$ de donde se deduce $\quad q = d\sqrt{\frac{f}{\varphi}}.$

El número que expresa q depende pues de las unidades adoptadas para calcular las longitudes y las fuerzas.

Unidad C. G. S. *de cantidad de electricidad. — Coulomb.* — Concíbese, pues que las masas eléctricas pueden referirse á las unidades de masa, de longitud y de tiempo adoptadas en el sistema C. G. S. La unidad de cantidad de electricidad así definida se llama *unidad absoluta*. En la práctica se la reemplaza por otra cantidad de electricidad *diez veces más pequeña*, á que se da el nombre de *coulomb* [1].

De manera que prácticamente se calculan las *cantidades de electricidad* en *coulombs*, á la manera que se valoran las longitudes en metros y las masas en kilogramos.

Unidad electrostática de cantidad de electricidad. — La ecuación [1] puede simplificarse mediante una elección apropiada de la unidad de electricidad. Si se define ésta diciendo que es *la cantidad de electricidad que ejerce, á la unidad de distancia, sobre una cantidad igual, una repulsión igual á la unidad de fuerza*, se tendrá evidentemente

$$\varphi = 1 \quad \text{y} \quad f = \frac{qq'}{d^2}. \qquad [2]$$

1. En memoria del físico francés Coulomb.

Tal es la *unidad electrostática* de cantidad de electricidad; un coulomb vale 3×10^9 unidades electrostáticas.

814. **Fuerza eléctrica. — Campo eléctrico.** — Cuando una masa eléctrica q, concentrada en un punto A, se encuentra en las proximidades de un sistema de puntos electrizados, sea aislados como A, sea reunidos constituyendo un cuerpo conductor único, aquélla experimenta una atracción ó una repulsión por parte de cada uno de los puntos del sistema. Estas acciones todas son fuerzas concurrentes que tienen una resultante única, la cual, ya atractiva ya repulsiva, se llama *fuerza eléctrica en el punto* A.

La fuerza eléctrica en un punto varía evidentemente, en magnitud y dirección, con la posición del punto respecto del sistema electrizado. La porción del espacio donde la fuerza eléctrica procedente de este sistema tiene un valor apreciable, se llama *campo eléctrico* del sistema.

Denomínase *intensidad del campo eléctrico en un punto* al valor de la fuerza atractiva ó repulsiva que se ejercería en este punto sobre la *unidad de electricidad positiva.*

Cuando la fuerza eléctrica tiene la misma dirección en todos los puntos de determinada región, se dice que el campo es en ella *uniforme.* Demuéstrase (833, 1°) que en este caso es también constante allí la intensidad del campo.

815. **Componentes de la fuerza en un punto del campo eléctrico.** — Puede determinarse por el cálculo la intensidad del campo en un punto cualquiera, y en consecuencia la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica que en ella se ejerce. Sean M el punto y q su carga, y sean q_1, q_2..., las masas eléctricas diseminadas en los puntos A_1, A_2... cuyas acciones constituyen el campo, y r_1, r_2..., sus distancias respectivas al punto M. Las fuerzas que concurren en este punto son

$$\frac{qq_1}{r_1^2} = f_1, \qquad \frac{qq_2}{r_2^2} = {}_2 \ldots$$

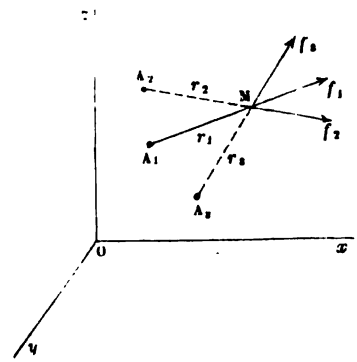


Fig. 734.

Sean tres ejes de coordenadas rectangulares. Descompongamos cada fuerza f según estos ejes (fig. 734).

Las componentes son $f_1 \cos \alpha_1$, $f_1 \cos \beta_1$, $f_1 \cos \gamma_1$, llamando α_1, β_1, γ_1 á los ángulos que forma la fuerza f_1 con los ejes. Si denominamos x, y, z á las coordenadas del punto M, y x_1, y_1, z_1 á las del punto A, se tiene

$$\cos \alpha_1 = \frac{x - x_1}{r_1}, \qquad \cos \beta_1 = \frac{y - y_1}{r_1}, \qquad \cos \gamma_1 = \frac{z - z_1}{r_1}.$$

Las componentes son pues

$$\frac{qq_1 (x - x_1)}{r_1^3}, \qquad \frac{qq_1 (y - y_1)}{r_1^3}, \qquad \frac{qq_1 (z - z_1)}{r_1^3},$$

estando r_1 definido por la ecuación

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2.$$

Efectuando la misma descomposición para cada fuerza, se tendrá :

como suma de las componentes según el eje de las x $\quad X = \Sigma \frac{qq_1 (x - x_1)}{r_1^2}$,

— — — y $\quad Y = \Sigma \frac{qq_1 (y - y_1)}{r_1^2}$,

— — — z $\quad Z = \Sigma \frac{qq_1 (z - z_1)}{r_1^2}$.

Por fin la fuerza eléctrica resultante estará dada por la diagonal del paralelógramo construído sobre X, Y, Z; tiene como valor $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

Se calculará análogamente la acción ejercida sobre el punto M por un cuerpo ó una serie de cuerpos electrizados, conductores ó no conductores. Bastará descomponer cada uno de estos cuerpos en elementos de volumen *infinitamente pequeños*, por medio de tres sistemas de planos paralelos á los planos de las coordenadas, y se considerarán X, Y, Z como las sumas de las componentes procedentes de cada uno de estos elementos de volumen electrizados.

CAPÍTULO III

DISTRIBUCIÓN Y PÉRDIDA DE LA ELECTRICIDAD.

816. **Distribución de la electricidad en la superficie de los cuerpos conductores.** — Coulomb llegó por la experiencia y Poisson por el cálculo á sentar el hecho fundamental siguiente:

Cuando un cuerpo, conductor ó aislado, se electriza, la electricidad libre, positiva ó negativa, se dirige exclusivamente á su superficie exterior.

1°. *Demostración experimental directa.* — Existen varias experiencias de demostración; he aquí la del curso de M. Lippmann :

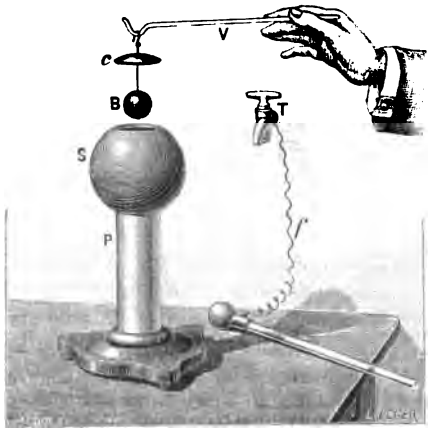


Fig. 735.

Se toma una esfera hueca de cobre S, aislada sobre un pie de parafina P, y abierta en su parte superior (fig. 735). El orificio puede ser exactamente cerrado por una tapadera c que completa la esfera y debajo del cual está suspendida una bola de cobre B por medio de un

hilo de seda blanca. Operando así se realiza el caso de un conductor hueco completamente cerrado, cuya parte interior es sin embargo posible explorar. Después de haber electrizado la esfera S poniéndola en contacto con un manantial eléctrico, se la toca *interiormente* con la bola B. Basta para ello inclinar el sostén P. Entonces se retira la tapadera y la bola B por medio de un garfio aislador V, y después se descarga la tapadera tocándola con una bola metálica que comunica con el suelo, mediante un alambre metálico *f* y, por ejemplo, una cañería metálica. Entonces se acerca el sistema á un electroscopio y se observa que éste permanece en el cero. Pero si por el contrario se toca *exteriormente* la esfera con la bola B, se recoge electricidad; pues si entonces se presenta B al electroscopio, origina una divergencia de las hojas de oro. Luego, no hay electricidad libre más que en la superficie externa.

Consecuencia. — Dos esferas del mismo radio llenas ó huecas, una conductora y aisladora la otra, adquirirán la misma carga en idénticas condiciones cuando la esfera aisladora haya sido metalizada superficialmente.

2ª. *Demostración a priori.* — Partiendo de la ley de Coulomb se demuestra por el cálculo *que no puede existir electricidad libre dentro de un cuerpo conductor.*

Recíprocamente, como esta consecuencia de la ley de Coulomb es demostrada por la experiencia, puede servir á su vez para probar indirectamente la ley y, en efecto, partiendo del hecho de la distribución de la electricidad en la superficie de los conductores, se pueden hallar por el cálculo las leyes de Coulomb; según demostró M. J. Bertrand.

817. **Densidad eléctrica.** — Debe admitirse, en consecuencia, que la electricidad libre forma en la superficie de los cuerpos electrizados una capa muy delgada. Mantiénela allí el poder aislador de la atmósfera ambiente y tiende sin descanso á escaparse, con esfuerzos más ó menos considerables.

Llámase *densidad eléctrica* á la *cantidad de electricidad* difundida *sobre la unidad de superficie*, suponiendo uniforme la distribución.

Densidad media y *Densidad en un punto.* — En el caso de una distribución variable, se empieza por definir la *densidad media* en un punto; es la razón entre la carga eléctrica de una pequeña superficie, tomada en torno de este punto, y la superficie entera; el límite hacia que esa razón tiende cuando se considera la superficie como tendiendo hacia cero, se llama la *densidad eléctrica* en el punto considerado. Es un coeficiente *teórico*, mientras que la densidad media es un coeficiente *experimental.*

Tensión eléctrica. — La electricidad difundida por una superficie dada ejerce en cada punto sobre el medio ambiente un esfuerzo para desprenderse. Este esfuerzo es igual á la resultante de las acciones repulsivas que la capa eléctrica total extendida sobre el conductor ejerce sobre la carga del punto considerado, y esta resultante se aplica al conductor. En efecto, si se electriza una superficie conductora *deformable*, tal como una red de moderador ó un globo de piel de gamuza dorado, etc., se la ve inflarse hacia el exterior.

Demuéstrase que esta resultante es una fuerza *normal* á la superficie del conductor : una burbuja de jabón esférico se dilata efectivamente por la electrización, aunque *permaneciendo esférica*, lo que no ocurriría evidentemente si la tensión fuera oblicua ó variase de un punto á otro. También se prueba que es *proporcional al cuadrado de la densidad eléctrica* en cada punto: siendo 2π el factor de proporcionalidad, se tiene pues $T = 2\pi\sigma^2$, designando por σ la densidad eléctrica y por T la tensión en el punto considerado (833,3°).

818. **Experiencias de Coulomb.** — Coulomb determinó la densidad eléctrica en los diferentes puntos de un conductor electrizado en equilibrio.

1°. *Método.* — Su método consistía en tocar el punto considerado por medio de un *plano de prueba*, que consiste en un disco metálico, tan pequeño como es posible, fijo en la extremidad de un soporte aislador.

M. Boudréaux ha perfeccionado el *plano de prueba* constituyéndolo por un disco D, — oro falso ó aluminio, — pegado en la base de un cilindro de parafina P provisto á su vez de un mango de ebonita E (fig. 736).

Aplicando el disco D en un punto de un conductor, se sustituye á la superficie de éste en el punto tocado, y sustrae *muy verosimilmente* una cantidad de electricidad proporcional á la carga del elemento en contacto. Coulomb medía esta cantidad llevando el plano de prueba

Fig. 736.

Fig. 737.

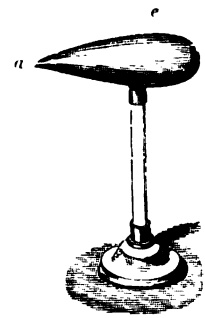


Fig. 738.

á su balanza. De la repulsión observada f deducía la carga q del plano de prueba mediante la fórmula

$$q = d\sqrt{f}.$$

2°. *Resultados generales.* — Coulomb probó experimentalmente que *la densidad eléctrica en un punto de un conductor aislado es proporcional á la cantidad total de electricidad distribuida por toda la superficie*, y

que *la relación de las densidades eléctricas en dos puntos de un conductor es independiente de la carga total.*

3°. *Influencia de la forma de los cuerpos.* — La densidad eléctrica es la misma en cada punto de la superficie de una esfera metálica. Prevéese *a priori* que debe ser así, por causa de la forma simétrica del conductor (fig. 737).

Si el cuerpo electrizado es un ovoide prolongado (fig. 738), la densidad eléctrica deja de ser uniforme; la electricidad, obedeciendo siempre á su propia repulsión, se acumula hacia las partes más agudas *a*, donde adquiere una densidad máximum.

En el caso de un elipsoide perfecto (fig. 739), la densidad de esta capa, en las extremidades de los ejes, es proporcional á su longitud.

En el caso de un disco de metal, la electricidad se acumula en los bordes.

En el de un cilindro terminado por dos hemisferios, la densidad es máximum en la superficie de estos últimos.

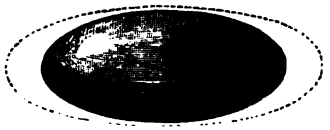


Fig. 739.

Poder de las puntas. — Llámase *poder de las puntas* á la propiedad que tienen las puntas *conductoras* de dejar perderse la electricidad. Esta propiedad, descubierta por Franklin, es una consecuencia de la distribución de la electricidad en la superficie de los conductores prolongados. En efecto, como la densidad eléctrica crece en razón inversa de la curvatura, la electricidad debe acumularse hacia las puntas: su tensión, que es proporcional al cuadrado de la densidad, crece en consecuencia con mayor rapidez todavía y no tarda en vencer la resistencia del aire; entonces es cuando el fluido se pierde en la atmósfera. Si se acerca la mano á la punta, se siente un ligero soplo, debido á la repulsión del aire, y si el desprendimiento de la electricidad ocurre en la oscuridad, se observa en la punta un penacho luminoso.

819. — **Acción de un conductor cargado de electricidad en equilibrio.** — La electricidad difundida por la superficie de un conductor en equilibrio, puede tener allí densidad constante ó variable en sus diversos puntos. Cuando la densidad es constante, dícese que la capa es *homogénea:* tal en el caso de una esfera conductora electrizada.

La acción de una capa homogénea sobre una masa de electricidad concentrada en un punto, sea interior, sea exterior á la capa, puede deducirse de las leyes de Coulomb. En el caso de conductores esféricos, está determinada por los teoremas siguientes:

I. *Punto interior.* — *La acción de una capa esférica homogénea sobre un punto interior es nula.*

Dicho de otro modo, una masa eléctrica concentrada en un punto,

en lo interior de una capa esférica homogénea, está siempre en equilibrio (833, 5°).

II. *Punto exterior.* — *La acción de una capa esférica homogénea sobre un punto exterior es la misma que si la masa eléctrica de la capa estuviera acumulada en el centro de la esfera.*

III. Los dos teoremas se aplican también al caso de una esfera electrizada maciza, con tal que esté formada por capas concéntricas y homogéneas.

820. **Acción protectora de un recinto conductor. — Cámara de Faraday.** — Una carga eléctrica en equilibrio, por intensa que sea, difundida por la superficie exterior de un conductor hueco, carece de acción sobre cualquier otro conductor que estuviera colocado dentro del primero.

Faraday demostró experimentalmente esta curiosa consecuencia, encerrándose en persona, con aparatos á propósito para revelar la presencia de la electricidad, en una cámara grande de paredes metálicas, sostenida por pies aisladores. Habiendo sido fuertemente electrizadas las paredes de la cámara, ni el operador, ni el aparato dieron la menor señal de electrización. Por el contrario, la cámara electrizada ejercía acción sobre los conductores externos.

Observación. — Un tejido metálico de red más ó menos compacta puede sustituir la pared continua de la cámara de Faraday: un recinto metálico de alambre de hierro, tal como una jaula metálica, constituye, para los cuerpos colocados dentro de ella, un recinto protector contra los efectos de la electricidad ambiente. Puede estar aislada ó en comunicación con el suelo.

821. **Comunicación y distribución de la electricidad sobre los cuerpos en contacto.** — Cuando se ponen en contacto dos cuerpos conductores, uno electrizado y en estado neutro el otro, hay reparto de la electricidad entre los dos cuerpos, en relación que depende de la que existe entre sus superficies y también entre sus formas ; y cuando se les separa, uno ha ganado y el otro perdido electricidad en todos sus puntos. Si no son conductores, no hay pérdida ó ganancia más que en los puntos de contacto.

Así observó Coulomb, por su método del plano de prueba, que en esferas metálicas aisladas, puestas primeramente en contacto, y electrizadas después en este estado, la electricidad se distribuye diversamente en sus superficies, según la relación entre los diámetros. Si estos diámetros son iguales, la densidad eléctrica es nula en el punto del contacto, no se hace sensible sino á 20 grados de este punto, crece rápidamente de 20 á 30 grados, con mayor lentitud de 60 á 90 y permanece siendo casi la misma de 90 á 100. Si los diámetros están en la relación de 2 á 1, la densidad, que sigue siendo nula en el punto de contacto, empieza por ser más considerable en la esfera mayor ; pero después aumenta con más rapidez en la pequeña, y á 180 grados del punto de contacto, la densidad eléctrica más fuerte se nota en ésta última.

822. **Pérdida de la electricidad.** — Los cuerpos electrizados pierden siempre con mayor ó menor rapidez su electricidad por bien aislados que estén. Este es un fenómeno generalmente inevitable y continuo, que limita la acumulación de la electricidad en los conductores, así como la precisión de las medidas electrostáticas. M. Eduardo Branly ha probado que las radiaciones violadas y ultravioladas influyen en la pérdida de la electricidad.

La goma laca oscura y la ebonita pueden servir para la construcción de aisladores ; pero el vidrio, que es *higroscópico*, debe ser invariablemente rechazado. La parafina, cuyo uso preconiza M. Boudréaux, es quizás el más perfecto de los aisladores. Ya hemos dicho que M. Hurmuzescu había comunicado á este aislador plasticidad y dureza combinándolo con el azufre en cierta proporción.

CAPÍTULO IV

CONSECUENCIAS DE LAS LEYES DE COULOMB. — NOCIONES FUNDAMENTALES SOBRE EL POTENCIAL ELÉCTRICO.

823. **Potencial de un conductor electrizado : Definición experimental.** — La expresión de *potencial eléctrico* fué introducida en la ciencia por Green en 1828. Corresponde á una propiedad de la electricidad perfectamente distinta de las que hemos estudiado ó indicado antes, con los nombres de *carga* ó *masa eléctrica*, de *densidad* y de *tensión*.

Puede darse una definición *experimental* del potencial eléctrico en el caso de un *cuerpo conductor* aislado, cargado de cierta capa de electricidad en equilibrio. Esta definición resulta de los dos hechos siguientes :

1er Hecho. — Si se toca el conductor en diferentes puntos con un plano de prueba, y se lleva el plano, después de cada contacto, á la balanza de Coulomb, se observará cada vez en general una repulsión diferente. Esto prueba que la *densidad eléctrica no es en general la misma* en los diferentes puntos del conductor, por más que éste se encuentre en un estado eléctrico permanentemente invariable. Pero si se ponen en comunicación por medio de un alambre metálico muy largo y fino, un punto cualquiera del cuerpo con la pequeña bola fija de la balanza de Coulomb, la bola móvil, previamente cargada de la misma electricidad, sufrirá cierta repulsión medida por determinado ángulo de separación. Ahora bien, si la comunicación se establece con otro punto cualquiera del conductor, *siempre se observará la misma repulsión*. Esta fuerza de repulsión es en consecuencia característica del estado eléctrico del conductor. Es un rasgo aná-

logo al que expresa un termómetro cuando se le introduce en una parte cualquiera de un cuerpo uniformemente calentado.

Si se ha tenido cuidado de tomar como plano de prueba una esfera cuyo radio sea de un centímetro, y de ponerla en comunicación con un punto cualquiera del conductor electrizado, por mediación de un alambre *largo* y *fino*, la carga que esta bola toma en tales condiciones mide por definición el *potencial* del conductor (suponiendo que cualquier otro conductor esté lejos de la *bola*).

2° Hecho. — Sean dos cuerpos A y B *electrizados positivamente*, que tengan como potenciales respectivos V_a y V_b : supongamos $V_a > V_b$.

Pongamos estos cuerpos en comunicación por dos puntos cualesquiera mediante un alambre metálico largo y fino. Se observará, — por el mismo procedimiento experimental, — que el potencial de A disminuye y que el de B aumenta hasta que ambos llegan á alcanzar un valor común V', medio entre V_a y V_b[1].

Experiencias. — Pueden efectuarse estas experiencias[2] electrizando dos conductores esféricos A y B, uno de radio R y el otro de radio 2R, cuyas superficies son S y 4S. Si se les comunican cargas Q y Q', que estén en la misma relación que sus superficies, *la densidad eléctrica será la misma* en los dos conductores, puesto que se tiene

$$\delta = \frac{Q}{S} \quad \text{y} \quad \delta' = \frac{4\,Q}{4\,S}.$$

Es posible convencerse de ello experimentalmente tocando con el plano de prueba dos puntos cualesquiera M y N de los dos conductores. Pero si se ponen los dos conductores en comunicación por medio de un alambre metálico largo y fino, que una los dos puntos M y N, se observará que pasa electricidad de la esfera grande á la pequeña : esto depende de que el potencial es *más alto* en la primera que en la segunda.

Conclusión. — Así pues, cada vez que un conductor electrizado, unido con otro conductor, cede ó toma electricidad positiva á este último, es que tiene un potencial *más* ó *menos elevado* que él : cada vez que no hay transmisión de electricidad de uno á otro, el potencial es idéntico en los dos.

La noción del potencial corresponde pues á una propiedad de la electricidad que desempeña en los cambios de electricidad entre dos conductores, el mismo papel que la *fuerza elástica de los gases* ó que

1. Mientras dura el estado variable del potencial, hay paso de electricidad de A á B, esto es, del cuerpo que tiene potencial más elevado al que lo tiene menos : el alambre conductor es entonces lugar de una *corriente eléctrica* que cesa desde que se obtiene la igualdad del potencial. El equilibrio se restablece desde que la electricidad se ha distribuído en los dos conductores de tal modo que sus potenciales sean idénticos.

2. En el terreno cualitativo puede reemplazarse la balanza de Coulomb por un electroscopio de hojas de oro y de tapón de parafina análogo al de la figura 729.

la *presión hidrostática* de los líquidos en los cambios de gases ó de líquidos entre dos recipientes, ó bien de la *temperatura* en los cambios de calor. Por causa de esta analogía se dan algunas veces al potencial eléctrico los nombres de *nivel eléctrico* y de *temperatura eléctrica*.

Observaciones. — 1°. *Diferencias de potenciales.* — La ruptura del equilibrio eléctrico es lo único que puede dar origen á los fenómenos de la corriente : luego éstos tienen como razón de ser *diferencias de potenciales*, á condición de que se efectúen entre conductores independientes, cargados y en equilibrio eléctrico.

2°. *Potencial cero.* — Para expresar las diferencias de potenciales, se toma el del suelo como término de comparación.

Todo conductor que puesto en comunicación con el suelo no da origen á corriente ninguna, se dice que está *en el potencial cero.*

3°. *Potencial positivo y potencial negativo.* — Está *en un potencial positivo* si, *puesto en la tierra*, ocurrieran las cosas como si la tierra le sustrajera electricidad positiva. Está *en un potencial negativo* si aquélla le suministrara electricidad positiva [1].

4°. Un cuerpo puede estar cargado de electricidad aun cuando se encuentre en el potencial cero. Tal es por ejemplo el caso de un conductor que comunica con el suelo y al cual se acerca un cuerpo electrizado.

824. **Definición matemática del potencial eléctrico en un punto.** — No se puede empezar por definir matemáticamente el *potencial de un conductor electrizado.* Hay que empezar por definir el *potencial en un punto.*

El caso más sencillo es el de un punto M que se encuentra en un *campo eléctrico* reducido á su vez á una masa eléctrica q, concentrada en otro punto A que estuviera situado á distancia r, del punto M.

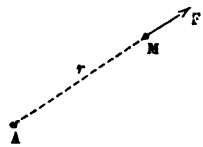


Fig. 740.

Llámase *potencial en un punto* M á la razón entre la masa actora q á su distancia r y el punto M, *que se supone cargado de la unidad de electricidad positiva* (fig. 740). Desígnasele ordinariamente por la letra V, y se escribe

$$V = \frac{q}{r},$$

siendo V positivo ó negativo según que la masa eléctrica actora es positiva ó negativa.

825. **Propiedades del potencial.** — Esta función tiene las propiedades siguientes :

I. *Expresión del campo eléctrico. — Si se toma el cociente* $\left(\frac{\Delta V}{\Delta r}\right)$ *del aumento* ΔV

1. Hay la costumbre de referir el sentido de los cambios de electricidad al movimiento de a electricidad positiva.

de la función V al aumento Δr de la variable r, y se hace tender Δr hacia cero, la razón $\frac{\Delta V}{r\Delta}$ tiende hacia un límite que, tomado con signo contrario, representa en magnitud y en signo la fuerza eléctrica en este punto.

Fig. 741.

En efecto, si la carga q es positiva, ejerce en M (fig. 741), sobre una masa positiva igual á 1, una fuerza repulsiva representada por $F = \frac{q}{r^2}$, siendo F positivo.

Ahora bien, el potencial en M es positivo é igual á $\frac{q}{r}$; si se da á r el crecimiento Δr, el potencial pasa á ser $\frac{q}{r + \Delta r} = V + \Delta V$ y resulta

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{1}{\Delta r}\left(\frac{q}{r + \Delta r} - \frac{q}{r}\right) = \frac{-q}{r^2 + r\Delta r}.$$

Haciendo tender Δr hacia cero, el denominador tiende hacia r^2 y se tiene

$$\lim. \frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{-q}{r^2}, \quad \text{de donde} \quad -\left(\lim. \frac{\Delta V}{\Delta r}\right) = \frac{q}{r_2} = F$$

Observación. — Se llegaría al mismo resultado considerando una masa q de electricidad negativa [1].

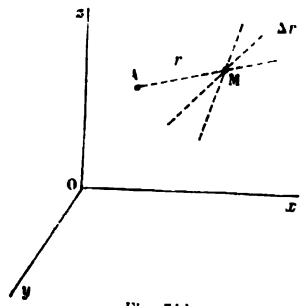


Fig. 742.

II. *Componentes del campo eléctrico.* — Si referimos el sistema de los puntos A y M á los tres ejes rectangulares Ox, Oy, Oz (fig. 742), el punto M quedará definido por tres coordenadas x, y, z y el A por otras tres x_1, y_1, z_1; la distancia r de estos dos puntos estará dada por la fórmula conocida

$$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}.$$

Por consiguiente, el potencial V del punto M, que es una función de r, será necesariamente una función de las tres coordenadas x, y, z. Si se comunica á r un aumento Δr, las coordenadas tomarán aumentos correspondientes Δx, Δy, Δz. Así como se ha considerado la razón $\frac{\Delta V}{\Delta r}$, se podrá considerar uno de los cocientes correspondientes $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, ó $\frac{\Delta V}{\Delta y}$, ó $\frac{\Delta V}{\Delta z}$. Y así como se ha calculado el límite de la razón $\frac{\Delta V}{\Delta r}$ cuando se hace tender Δr hacia cero, se podrá calcular los límites correspondientes de las razones $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, $\frac{\Delta V}{\Delta y}$, $\frac{\Delta V}{\Delta z}$.

Sentado esto, si se quiere obtener la componente de la fuerza eléctrica que se ejerce en M, según una cualquiera de las direcciones Ox, Oy, Oz, no habrá más que aplicar la propiedad siguiente del potencial :

El límite de la razón $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, tomado con sentido contrario, representa en magnitud y signo la componente de la fuerza eléctrica según la dirección Ox.

Se tendrá pues

$$F_x = \lim. \left(\frac{\Delta V}{\Delta x}\right).$$

1. El límite del cociente $\frac{\Delta V}{\Delta r}$ es lo que se llama la *derivada* de la función V respecto de la variable r.

Se tendría análogamente

$$F_y = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y} \qquad y \qquad F_z = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z},$$

llamando F_x, F_y, F_z á las componentes de la fuerza F según las direcciones Ox, Oy, Oz.

Tiénese en efecto

$$[1] \qquad F_x = \frac{q(x - x_1)}{r^3}.$$

Ahora bien, si se calcula, por el método indicado anteriormente, $\frac{\Delta V}{\Delta x}$, se encuentra

$$[2] \qquad \lim. \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{q(x - x_1)}{r^3}.$$

Comparando las ecuaciones [1] y [2] se tiene pues

$$F_x = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x},$$

que era lo que se deseaba demostrar.

Análogamente se tendría

$$F_y = \frac{q(y - y_1)}{r^3} = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y} \qquad y \qquad F_z = \frac{q(z - z_1)}{r^3} = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z}.$$

Observación. — El potencial permite hallar en consecuencia, no sólo el valor de la fuerza eléctrica en el punto considerado, sino también las componentes de esta fuerza según una dirección cualquiera.

III. *Expresión del trabajo eléctrico. — El trabajo efectuado por la fuerza eléctrica, para mover la unidad de electricidad positiva entre dos puntos* M *y* M' *del campo, está representado por la variación (tomada en sentido contrario) del potencial entre estos dos puntos.*

Tiénese pues

$$W = -(V' - V).$$

Si se imagina que la unidad de masa positiva se mueve en el campo, de M á M', bajo a acción de la fuerza eléctrica, (fig. 741), ésta ejecuta un trabajo que es fácil calcular. Basta aplicar la definición relativa al trabajo de una fuerza variable en magnitud y dirección, que sería de la forma $f = \frac{q}{r^2}$, trabajo que es igual á la suma de los trabajos componentes F_x, F_y, F_z, cuya dirección es constante. Llamando r y r' las distancias de los puntos M y M', resulta una vez hecho el cálculo,

$$W = q\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right).$$

Ahora bien, se tiene

$$V = \frac{q}{r} \qquad y \qquad V' = \frac{q'}{r'}; \qquad \text{luego} \qquad W = -(V' - V).$$

que era lo que se deseaba demostrar.

De esta manera se posee una significación *mecánica* de la diferencia de potencial entre dos puntos, que es la misma si se aumenta una cantidad idéntica C el potencial en todos los puntos del campo considerado, pues esta constante C se elimina en la diferencia.

IV. *Significado del potencial en el caso de que se haga* C = O. — Si el punto M', en vez de estar cercano al M, se alejara hasta lo infinito, se tendría $r' = \infty$ y por consiguiente V' = O, toda vez que V' es siempre igual á $\frac{q}{r'}$. Entonces se tiene, según la ecuación precedente, W = V. Puede decirse por tanto que *el potencial en*

un punto es numéricamente *igual al trabajo que efectuaría la fuerza eléctrica en este punto para rechazar la unidad de electricidad positiva, desde* M *hasta el infinito.*

Este trabajo sería evidentemente el mismo, *en valor absoluto*, si la fuerza atrajera la unidad de masa positiva desde el infinito hasta el punto considerado.

Observación. — Se podría, según se ha hecho en varios casos, tomar como definición esta propiedad del potencial; entonces se deduciría de ella la fórmula $V = \frac{q}{r}$.

826. **Potencial en un punto debido á un sistema cualquiera de masas eléctricas.** — Hasta ahora hemos examinado el caso de que el *campo eléctrico* esté constituído por una sola masa eléctrica actora; de este caso sencillo se pasa naturalmente al de un campo eléctrico constituído por un número cualquiera de masas eléctricas actoras. Estas masas pueden ser distintas, ó estar reunidas en un conductor único electrizado.

La definición del potencial es la misma: es igual á la suma de los cocientes $\frac{q}{r}, \frac{q'}{r'}, \frac{q''}{r''}, \ldots$, que corresponden á cada una de las masas actoras sobre el punto M. Se tiene pues

$$V = \frac{q}{r} + \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \ldots = \Sigma \frac{q}{r}.$$

Cada uno de los términos de esta suma es positivo ó negativo, según la naturaleza de la electricidad concentrada en el punto correspondiente, y el potencial es la suma algébrica de estos cocientes [1].

Las propiedades del potencial son *exactamente las mismas* en el caso de un sistema de masas eléctricas que en el de una sola masa actora: tal es la causa de la fecundidad de esta noción.

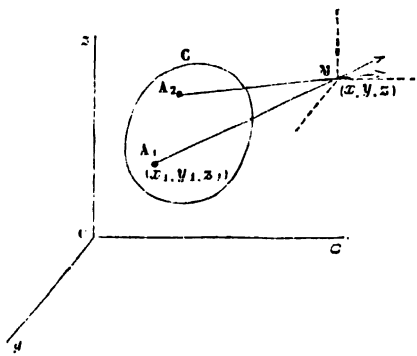


Fig. 743.

La fuerza eléctrica en M es la resultante de las fuerzas concurrentes que provienen de las diversas masas (fig. 743).

Las componentes X, Y, Z de la fuerza eléctrica según los tres ejes son también:

$$F_x = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x},$$

$$F_y = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta y},$$

$$F_z = -\lim. \frac{\Delta V}{\Delta z},$$

Pues el límite de la razón $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ es igual á la suma de los límites de los aumentos de las funciones parciales $\frac{q}{r}$

1. En el caso de que las masas eléctricas sean distintas, se obtiene el potencial efectuando una simple suma algébrica. En el caso de que el fluido ocupe una superficie continua, de forma geométrica definida, se calcula en general el potencial por medio de los procedimientos del cálculo integral.

que componen la función total V ó $\Sigma \frac{q}{r}$; ahora bien, el primero de estos límites parciales representa la proyección sobre el eje de las Ox de la fuerza eléctrica correspondiente, y F_x es precisamente la suma de estas proyecciones. Lo mismo ocurre con F_y y con F_z.

827. **Superficies equipotenciales ó superficies de nivel.** — Dado un conductor electrizado (fig. 744) de cierta forma C, los diversos puntos del espacio ambiente no tienen el mismo potencial relativamente á este conductor; pero se puede suponer que el espacio se encuentra repartido en superficies geométricas donde el potencial tiene el mismo valor en todos los puntos: cada una de estas superficies se llama *superficie equipotencial* ó *superficie de nivel*, respecto del sistema eléctrico dado; el valor del potencial no varía más que cuando se pasa de una *superficie equipotencial á otra.*

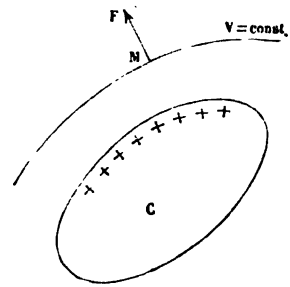


Fig. 744.

Por ejemplo, si el conductor electrizado se reduce á un punto, las superficies de nivel son esferas concéntricas á este punto.

Propiedad de las superficies equipotenciales. — La fuerza eléctrica ejercida por un sistema eléctrico C (fig. 744) *en cada punto del espacio, es normal á la superficie equipotencial que pasa por este punto.*

En efecto, si se busca la componente de esta fuerza según la dirección Ox de una tangente cualquiera á la superficie, se tiene, con arreglo á un teorema precedentemente demostrado,

$$F_x = -\left(\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x}\right),$$

designando por Δx el aumento de la distancia paralelamente á la tangente, y por ΔV el aumento de potencial correspondiente. Pero la tangente á la superficie en el punto M tiende á confundirse con la superficie misma: por consiguiente, el aumento de potencial según la tangente tiende á confundirse con el aumento de potencial según una línea de la superficie. Pero, por definición, todo aumento de potencial según una línea cualquiera de la superficie es *nulo*, puesto que la superficie es equipotencial. Tiénese pues

$$\Delta V = 0.$$

y

$$-\lim. \frac{\Delta V}{\Delta x} = 0,$$

y por consiguiente

$$F_x = 0.$$

Lo mismo sería con toda otra componente de la fuerza según una dirección cualquiera que fuese tangente á la superficie en el punto M: luego la fuerza es perpendicular á todas las tangentes en torno del punto considerado, y por tanto *normal* á la superficie.

828. **Líneas de fuerza.** — Imaginemos una serie de superficies de nivel infinitamente cercanas unas á otras. En un punto M de la primera (fig. 745), la fuerza es dirigida según la normal. Esta corta á la segunda superficie en un punto M'; en este punto la fuerza sigue siendo normal y así sucesivamente. La serie de estos elementos infinitamente pequeños de normal forma una curva: esto es lo que se llama una *línea de fuerza.* Queda definida por la propiedad de que *en cada uno de sus puntos, la fuerza eléctrica es tangente á la curva.*

Por cada punto del espacio pasa una *línea de fuerza*, así como una *superficie equipotencial.*

Dado un sistema cualquiera de masas eléctricas, sus acciones atractivas ó repulsivas se ejercen á distancias infinitas, en el espacio ambiente. Pero á cierta distancia, variable con la cantidad de electricidad, estas acciones se hacen despreciables.

829. **Condición de equilibrio eléctrico en un conductor.** — *El equilibrio eléctrico no*

puede existir en un conductor electrizado más que en el caso de que todos sus puntos tengan el mismo potencial.

En efecto, sean dos puntos M y M' en un campo eléctrico. Supongamos que formen parte de un mismo conductor y que tengan potenciales diferentes V y V'. Sábese que el trabajo desarrollado por la fuerza eléctrica para transportar la unidad de electricidad positiva de M á M' es igual á $-(V'-V)$. Luego, llamando F á la componente del campo, en el elemento Δe del movimiento, se tiene

$$V - V' = \Sigma Fe.$$

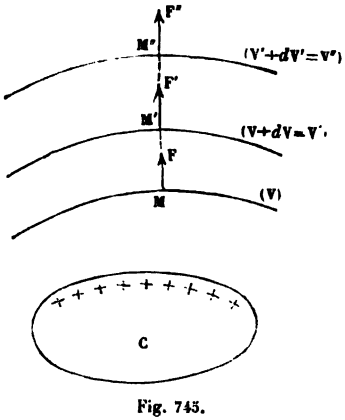


Fig. 745.

De la hipótesis $V \gtrless V'$ resulta que el campo no es nulo; y, como el conductor no puede oponer ninguna resistencia al movimiento del fluido, la acción del campo determinará nueva descomposición del fluido. No puede en consecuencia haber equilibrio más que en el caso de que $V - V' = 0$, es decir, si $V = V'$.

Consecuencia. — La superficie de un conductor electrizado en equilibrio es á su vez una *superficie de nivel.* Hasta se puede decir que el volumen limitado por esta superficie es un volumen de nivel. El potencial de un conductor ha sido definido experimentalmente por esta propiedad (823).

830. **Potencial de los conductores electrizados.** — Cuando *se aisla* en el espacio un conductor electrizado, quiere decir, *cuando los cuerpos inmediatos están á distancia suficiente para no influir sobre él,* su potencial depende únicamente de la carga eléctrica difundida por su propia superficie. Al hallarse en equilibrio la carga, su potencial es idéntico en todos los puntos: el de uno cualquiera de ellos constituye lo que se llama el *potencial del conductor.* Este hecho se demuestra por lo demás con la experiencia del § 823: pues la desviación de las hojas de un electroscopio permanece invariable cuando el alambre de comunicación entra en contacto con un punto cualquiera de la masa del conductor electrizado en equilibrio, por más que no haya electricidad libre en este punto, y que un plano de prueba no podría adquirir ni rastro de ella.

Dada una esfera metálica electrizada aislada en el espacio, se obtendrá su potencial calculando la función para el centro. Si R es el radio, se tiene

$$V = \Sigma \frac{q}{R} = \frac{q + q' + q'' \cdots}{R} = \frac{Q}{R}.$$

En el caso contrario hay que tener en cuenta todas las cargas eléctricas distribuídas en el espacio cuando se calcula el potencial V de un conductor.

Observación. — Se ve que adoptando la definición matemática, una esfera de radio 1, que tuviera carga igual á la unidad, tendría potencial uno.

831. Expresión de la densidad en un punto de un conductor electrizado en equilibrio. — La capa eléctrica que cubre un conductor en equilibrio forma pues una superficie de nivel. Pero si la componente tangencial de la fuerza eléctrica es nula para un punto cualquiera de la capa, la componente normal tiene valor perfectamente determinado en cada punto, pues *es la fuerza eléctrica misma*. De modo que la electricidad difundida por la superficie de un conductor es rechazada de él normalmente en cada punto, y no se conserva en la superficie sino por la acción del medio ambiente.

Caso de una esfera. — La capa de electricidad es homogénea; y si se llama σ á la densidad, R al radio de la esfera, Q á la carga, se tiene por una parte

$$[1] \qquad F = \frac{Q}{R^2} \quad \text{y} \quad Q = 4\pi R^2 \sigma. \qquad [2]$$

de donde se deduce

$$[3] \qquad F = 4\pi\sigma \quad \text{y} \quad \sigma = \frac{1}{4\pi} \cdot F. \qquad [3\ bis]$$

Caso de un conductor cualquiera. — La fórmula [3] es general y se aplica á un conductor de forma cualquiera. En el caso general, la fuerza F en un punto puede expresarse en función de la variación del potencial. Sea V' el valor del potencial en una superficie de nivel infinitamente cercana á la del conductor, y sea e la porción de normal comprendida entre las dos superficies. Tiénese, según se ha visto precedentemente,

$$F = -\frac{V' - V}{e}.$$

Llevando este valor á la ecuación [3 *bis*], resulta

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{V' - V}{e}.$$

832. Flujo de fuerza. — 1°. *Definición.* — Se llama *flujo de fuerza*, relativo á una superficie S sumergida en un campo eléctrico, á la suma de los productos de cada uno de sus elementos de superficie por la proyección de la intensidad del campo en cada punto sobre la normal al elemento.

Este flujo tiene como expresión

$$\Sigma\ F.\Delta S \cos (F, N).$$

Cada uno de los términos algébricos F ΔS cos. (F, N) es tomado convencionalmente con el signo + ó el signo —, según que el campo va de la superficie hacia el exterior ó hacia el interior.

2°. *Expresiones diversas del flujo elemental* F. ΔS cos. (F, N). — Si el campo F (fig. 746), en el punto donde se encuentra el elemento A, es producido por la carga m situada á la distancia r, se tiene, con arreglo á la ley de Coulomb,

$$F = \frac{m}{r^2},$$

luego el flujo elemental

$$F\Delta S \cos (F, N), = \frac{m}{r^2} \cdot \cos (F, N), \Delta S.$$

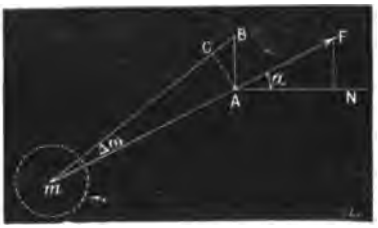


Fig. 746.

Pero el producto ΔS. cos. (F, N) es igual á la proyección AC del elemento AB sobre la esfera AC descrita desde m como centro con m A como radio; luego, haciendo AC = $\Delta\sigma$,

$$F.\Delta S. \cos (F, N) = m \frac{\Delta\sigma}{r^2}.$$

Designando por $\Delta\omega$ la porción de la esfera (descrita desde m como centro con un radio igual á la unidad) que es determinada por el cono de vértice m y de base ΔS, se tiene, en razón de la semejanza,

$$\frac{\Delta\omega}{1} = \frac{\Delta\sigma}{r^2},$$

y por consiguiente

$$F\ \Delta S \cos(F, N) = m\Delta\omega.$$

La superficie esférica $\Delta\omega$ es, por definición, el *ángulo sólido* bajo que se ve el elemento de superficie ΔS desde el punto m.

3°. Observación. — Si el campo proviene de varias cargas m, m', m'',..., que separadamente determinan en A los campos F, F' F'',...., está claro que la componente del campo resultante, según la normal N, tendría como expresión

$$F \cos(F, N) + F' \cos(F', N) + \ldots,$$

y el flujo elemental sería entonces

$$F.\ \Delta S.\cos(F, N) + F'\ \Delta S \cos(F', N) + \ldots = m.\Delta\omega + m'\Delta\omega' + \ldots = \Sigma\ m\Delta\omega$$

de donde se deduce que el *flujo total*, relativo á un sistema de cargas, es igual á *la suma de los flujos totales*, relativos á cada una de las cargas. Esta adición puramente algébrica de los flujos explica la fecundidad de las propiedades numéricas de esta noción.

833. **Teorema de Gauss.** — *El flujo total relativo á una superficie cerrada, sumergida en un campo eléctrico es igual á* $4\pi\Sigma m$ (Σm representa la suma algébrica de las cargas envueltas por la superficie).

Para demostrar esta propiedad, basta calcular los términos que se introducen en la suma $\Sigma F.\ \Delta\ S \cos.(F, N)$, sea por una carga exterior, sea por otra interior á la superficie.

1°. *La carga* m *está por la parte exterior.* — Los flujos en A y A' (fig. 747) tienen el mismo valor $m\ \Delta\omega$, pero llevan signos contrarios por causa de lo anteriormente convenido (832); luego en este caso se tiene

$$\Sigma\ m\ \Delta\omega = 0.$$

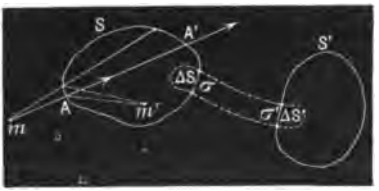


Fig. 747.

El campo es más intenso en A que en A'; pero como la superficie del elemento A' es mayor, la composición se establece para el valor de los flujos por causa de la forma de la ley de Coulomb. No ocurriría lo mismo si la acción eléctrica variara de otro modo que en razón inversa del cuadrado de la distancia.

2°. *La carga* m *está en lo interior.* — El flujo en A (fig. 747) tiene como valor $m\ \Delta\omega$. Moviendo A sobre la superficie S, el signo permanece siendo el mismo, pues la carga + 1 situada en A es constantemente rechazada ó constantemente atraída, según que la carga m' es positiva ó negativa.

Pero $$\Sigma\ m'\Delta\omega = m'\ \Sigma\ \Delta\omega;$$

y la suma de los $\Delta\omega$, para toda superficie S, constituye la superficie total 4π de la esfera de radio 1 que tiene m' como centro: luego el flujo relativo á m' tiene como valor

$$m'\ \Sigma\ \Delta\omega = 4\pi m';$$

y, según la observación precedente, las otras cargas interiores darán análogamente $4\pi m''$, $4\pi m'''$,..., en conjunto

$$4\pi(m + m' + m''' + \ldots), \quad \text{esto es} \quad 4\pi\ \Sigma\ m.$$

834. **Aplicaciones.** — 1°. *Tubo de fuerza. — Campo en un punto cercano á un conductor.* — Sean dos conductores S, S' en equilibrio eléctrico (fig. 747) y σ la densidad eléctrica en el elemento ΔS : calculemos el campo F en un punto M infinitamente próximo á la superficie.

Como el conductor está en equilibrio eléctrico, forma parte de las superficies equipotenciales del campo. Tracemos la superficie equipotencial que pasa por M, así como las líneas de fuerza que se apoyan en el contorno del elemento ΔS. (El conjunto de estas líneas de fuerza constituye lo que se llama un *tubo de fuerza* para recordar que la dirección del campo es tangente á este tubo en todo punto de la superficie.) Prolonguemos este tubo en lo interior del conductor y limitémoslo por una superficie cualquiera.

La superficie así formada es tal que el elemento paralelo á ΔS es el único en poner término al flujo. En efecto, en todo punto interior al cuerpo S el camp es nulo, y en todo punto de la superficie lateral es tangente á esta superficie. E flujo se reduce pues á $F\Delta S$; pero, en virtud del teorema de Gauss, es también igual á $4\pi \Sigma m$, quiere decir, en el caso actual, á $4\pi\sigma\Delta S$; luego

$$F.\Delta S = 4\pi\sigma\,\Delta S, \qquad \text{de donde} \qquad F = 4\pi\sigma.$$

2°. *Campo en un punto de la superficie.* — Si se suprime por el pensamiento el elemento ΔS (fig. 748), es claro que el campo será el mismo en dos puntos M y M', infinitamente próximos y situados á una parte y otra de la superficie, pues todas las cargas actoras están físicamente á la misma distancia de los dos puntos y por el mismo lado. Ahora bien, la adición del elemento ΔS anula la acción en M; ésta es pues igual á la que se ejercía primitivamente en M, pero de signo contrario. Y como los campos debidos á la carga de ΔS en M y M' son visiblemente opuestos, las dos acciones se suman en M' : luego la acción primitiva era igual á la mitad de $4\pi\sigma$ ó $2\pi\sigma$.

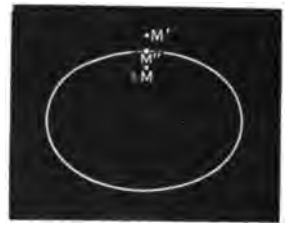


Fig. 748.

Tal es por consiguiente el campo debido á la carga del conductor en un punto M'' de su superficie; pues se puede disminuir tanto como se quiere la extensión de ΔS sin que el razonamiento deje de ser exacto y hacer que M y M' tiendan indefinidamente hacia M''.

3°. *Tensión en un punto.* — Como la carga total de ΔS tiene por valor $\sigma\Delta S$ siendo la acción sobre la unidad de carga $2\pi\sigma$, la acción total es

$$2\pi\sigma.\sigma\,\Delta S = 2\pi\sigma^2\,\Delta S.$$

Esta fuerza, referida á la unidad de superficie de densidad uniforme σ, tiene como valor $2\pi\sigma^2$: esta es la *tensión eléctrica* en ΔS.

Aplicada al elemento ΔS del conductor, tiende á levantarlo y tiene como valor $2\pi\sigma^2\Delta S$.

4°. *Elementos correspondientes.* — Continuando el tubo de fuerza hasta el conductor S' y limitándolo en lo interior de S' (fig. 747) el flujo total es nulo, puesto que explorando los diversos puntos de la superficie, se encuentra por todas partes, ó bien un campo tangente (superficie lateral), ó bien un campo nulo (superficie interior del conductor). Si σ' es la densidad eléctrica en $\Delta S'$, el flujo tiene por lo demás como valor

$$4\pi(\sigma\,\Delta S + \sigma'\,\Delta S'), \qquad \text{de donde se deduce que} \qquad [1] \quad \sigma\Delta S + \sigma'\,\Delta S' = 0.$$

Como ΔS y $\Delta S'$ son cantidades esencialmente positivas, se ve primeramente que las densidades σ y σ' son de signos contrarios, esto es, que las cargas que aparecen en las dos bases del tubo ó *elementos correspondientes*, son de signo contrario. Por otra parte, son iguales en valor absoluto, puesto que la ecuación [1] da

$$\sigma\,\Delta S = -\sigma'\,\Delta S', \qquad q = -q'.$$

5°. *Acción de una capa esférica homogénea sobre un punto exterior ó interior.* —

Esta acción es la misma que si toda la carga estuviera condensada en el centro.

Si se traza en torno de una esfera conductora cargada con una capa M de electricidad en equilibrio, una esfera concéntrica de radio R, el campo en todo punto de esta esfera tendrá, por razón de simetría, el mismo valor F y estará dirigido según el radio que á él llega ; de modo que el flujo que atraviesa la superficie tendrá como valor

$$\Sigma\, F.\Delta S = F\, \Sigma\, \Delta S = F.4\pi R^2.$$

Pero según el teorema de Gauss, el flujo tiene también como expresión $4\pi M$; luego

$$F.\,4\pi R^2 = 4\pi M \qquad \text{de donde} \qquad F = \frac{M}{R^2}.$$

De modo que el campo es el mismo que si la carga M se encontrara en el centro de la esfera. En el caso de un punto interior, el mismo razonamiento conduce á $F = 0$.

835. **Conductores electrizados comunicantes.** — De la condición de equilibrio de una capa eléctrica sobre un conductor se deduce directamente una consecuencia muy importante.

Si se ponen en comunicación dos conductores electrizados por medio de un alambre metálico, el equilibrio no puede existir más que cuando el potencial ha llegado á ser el mismo en todas partes.

En efecto, estos dos conductores no forman ya sino uno solo, al cual se aplica la condición general de equilibrio eléctrico.

Cuando se pongan en comunicación dos conductores de potenciales desiguales, se producirá necesariamente un movimiento de fluido de uno hacia otro. Todo ocurrirá como si el conductor del potencial más elevado enviara electricidad + al conductor del potencial menos elevado, hasta que se realice la igualación. Esta propiedad se demuestra por la experiencia y gracias á ella hemos generalizado precedentemente la definición experimental del potencial.

836. **Capacidad eléctrica.** — *El potencial de un conductor electrizado en equilibrio, y alejado de todo otro conductor, es proporcional á su carga eléctrica total.*

En efecto, por definición se tiene $V = \Sigma \frac{q}{r}$. De consiguiente, el potencial es una suma de fracciones, cada una de las cuales tiene como numerador la masa de cada uno de los puntos del conductor. Si cada una de estas masas se hace doble, triple, cuádruple, etc., cada término $\frac{q}{r}$ de la suma quedará multiplicado por el mismo cociente, y así ocurrirá también con la suma.

En consecuencia se puede plantear la ecuación

$$\frac{Q}{R} = C, \qquad \text{ó bien} \qquad Q = CV,$$

donde Q designa la carga total del conductor, V su potencial y C una constante que depende de la forma y de las dimensiones de

aquél. Esta constante C se llama la *capacidad eléctrica* del conductor.

Es *numéricamente* igual á la cantidad de electricidad de que hay que cargar al conductor para darle un potencial igual á 1.

Observación. — Cuando se pone un conductor en comunicación con un foco eléctrico de potencial constante V, adquiere carga Q completamente determinada por su capacidad eléctrica C. Análogamente, si se pone cierto peso de una sustancia en comunicación con un manantial calorífico de temperatura constante T, gana una cantidad de calor Q completamente determinada por la capacidad calorífica C: tiénese en efecto $Q = CT$.

837. **Unidades de capacidad eléctrica : unidad absoluta** (C. G. S.) **y unidad práctica.** — Las capacidades eléctricas se calculan por medio de una unidad particular, que depende de las unidades fundamentales C. G. S. Esto es lo que se llama la *unidad absoluta* ó la *unidad* C. G. S. de capacidad eléctrica.

En la práctica esta unidad sería demasiado grande para las aplicaciones corrientes. Así es que se la ha reemplazado por una unidad secundaria de capacidad, que vale $\frac{1}{10^9}$ de la unidad absoluta y que se llama un *farad*. De modo que las capacidades se expresan en *farads* ó en *microfarads*, como los potenciales en *volts* y las cantidades de electricidad en *coulombs*.

838. **Distribución de la electricidad entre diversos conductores. — Ecuaciones del equilibrio eléctrico.** — Sea un número cualquiera de conductores electrizados en equilibrio (tomaremos como ejemplo tres) cuyas capacidades son C', C'', C''' y los potenciales V', V'', V''' : sus cargas Q', Q'', Q''' quedan completamente determinadas. Mientras permanecen aislados uno de otro, el equilibrio eléctrico persiste en cada uno de ellos. Si se les pone en comunicación entre sí, se produce un movimiento de electricidad, seguido de un nuevo estado de equilibrio. Este se alcanza cuando el potencial llega á ser idéntico en todas partes. Por lo demás, es evidente que la cantidad total de electricidad no ha cambiado, sino que se ha distribuido de modo á propósito para igualar los potenciales. El conjunto de los conductores, supuestos muy distantes unos de otros, forma ahora un conductor único cuya capacidad C es igual á la suma de las capacidades y la carga total á la suma de las cargas parciales.

Se tiene pues

$$C = C' + C'' + C''' \qquad \text{á la vez que} \qquad Q = Q' + Q'' + Q'''.$$

Estas dos ecuaciones determinan el nuevo potencial V, pues se tiene

$$[1] \qquad V = \frac{Q}{C} = \frac{Q' + Q'' + Q''' + \ldots}{C} = \frac{V'C' + V''C'' + V'''C'''}{C' + C'' + C''' + \ldots},$$

Observaciones. — 1°. Puede escribirse esta ecuación en la forma general

$$V \Sigma (C') = \Sigma (V' C'),$$

es decir que *el producto del potencial final por la capacidad total es igual á la suma de los productos análogos efectuados para cada conductor parcial.*

Esta ecuación recuerda la de la mezcla de los gases (189), ó la que se obtiene expresando que un sistema de cuerpos, de temperaturas respectivas V', V'', V''.. y de capacidades caloríficas C', C'', C''.... mezclados en un recipiente adiabático;

han tomado una temperatura común V á consecuencia de un cambio de calorías.

839. **Consecuencias y casos particulares.** — 1°. Para dos conductores electrizados cualesquiera, la ecuación [1] se convierte en

$$[2] \qquad V = \frac{V'C' + V''C''}{C' + C''}.$$

Si las dos cargas y las dos capacidades son idénticas, se tiene

$$[3] \qquad V = \frac{2V'C'}{2C} = V';$$

quiere decir que *el potencial permanece idéntico*,

Si las dos cargas son iguales y de signos contrarios, resulta

$$[4] \qquad V = \frac{V'C' - V''C''}{C' + C''} = 0, \quad \text{de donde} \quad Q = 2C' \times 0 = 0,$$

es decir que *los dos conductores aislados en el espacio vuelven al estado neutro*

Por fin, si sólo está electrizado uno de los conductores, se tiene

$$[5] \qquad V = \frac{Q'}{C' + C''} = \frac{V'C'}{C' + C''} = V'\frac{C'}{C' + C''},$$

y si $C' = C''$,

$$V = \frac{1}{2}V'.$$

De modo que el potencial varía en razón inversa de su capacidad.

5°. ***Método de medida de los potenciales.*** — Si la capacidad C' de uno de los conductores es muy grande respecto de la del otro, de manera que esta última sea despreciable en su suma, se tendrá, admitiendo que el segundo conductor se encuentre en estado neutro,

$$V = V'.$$

El potencial no cambiará.

Este caso particular es el que se aplica en la medida experimental del potencial de un conductor electrizado por medio de una pequeña esfera (816).

Observación. — El conocimiento del potencial final y de las capacidades del sistema permite calcular el potencial inicial, mediante la ecuación [2].

840. **Cálculo de la energía necesaria para cargar un conductor á un potencial determinado.** — Calculemos, por ejemplo, la energía necesaria para cargar un conductor de capacidad C con un potencial V. La carga que ha de comunicársele tiene como valor $M = CV$. Sea cero el potencial inicial del conductor. La adición de la carga $\frac{M}{n}$, que es tan pequeña como se quiere, no da origen más que á un trabajo despreciable.

Esta carga lleva el conductor al potencial

$$V_1 = \frac{M}{nC}.$$

Las adiciones $\frac{M}{n}$ siguientes necesitan los trabajos sucesivos

$$V_1 \cdot \frac{1}{C}\frac{M}{n} \quad \text{ó} \quad \left(\frac{M}{n}\right)^2 \frac{1}{C}, \; V^2 \frac{M}{n} \quad \text{ó} \quad \left(\frac{M}{n}\right)^3 \frac{1}{C}, \text{ etc.}$$

tanto que el trabajo total necesario para la carga tendrá como valor

$$\frac{1}{C}\left(\frac{M}{n}\right)^2[1+2+3+\ldots+(n-1)]$$

ó

$$\frac{M^2}{n^2}\cdot\frac{1}{C}\,\frac{n(n-1)}{2}=\frac{M^2}{2C}\left(1-\frac{1}{n}\right).$$

Si se hace tender n hacia el infinito, para dar rigor á las consideraciones precedentes, puesto que entonces se opera de manera absolutamente continua, se tiene

$$W=\frac{M^2}{2C}=\frac{1}{2}MV=\frac{1}{2}CV^2,\quad \text{pues}\quad M=CV.$$

Esta energía es la *energía eléctrica* del conductor de capacidad C, cargado con el potencial V. Se la recupera por la descarga [1].

CAPÍTULO V

INFLUENCIA ELECTROSTÁTICA.

841. **Influencia en los cuerpos conductores.** — *Estudio experimental.* — La electrización por influencia en el caso de cuerpos buenos conductores se prueba por medio de los experimentos siguientes, que se deben á Æpinus.

Tómase un cilindro de latón A, aislado en un pie de vidrio, y que lleva en sus extremidades dos pequeños péndulos eléctricos, de bolas de saúco é hilos de cáñamo, y fijos en vástagos metálicos (fig. 749), que son conductores. Cuando se le coloca á cierta distancia de un foco de electricidad *positiva* M, se observa la serie de fenómenos siguientes:

1°. Los dos péndulos *divergen* inmediatamente : luego ha habido electrización instantánea :

2°. Si se presenta al péndulo más cercano al foco una barra de lacre, electrizado negativamente, se observa una repulsión : luego este péndulo está cargado de electricidad negativa. Presentando al otro péndulo un tubo de vidrio electrizado positivamente, hay también repulsión : luego este péndulo está electrizado positivamente. Por consiguiente, *un cuerpo electrizado por influencia y aislado posee al mismo tiempo, en sus extremos opuestos, las dos especies de electricidad en estado libre.*

Si se colocan varios péndulos á lo largo del cilindro, se observa que su divergencia disminuye rápidamente á partir de los extremos, siendo nula en cierto número de puntos, que constituyen la *línea neutra.*

1. Véase J. Joubert. *Traité élémentaire d'électricité.*

También se puede probar la existencia de una línea neutra tocando con un plano de prueba las diversas regiones del cilindro. Nunca está en el punto medio de éste; su posición depende de la carga eléctrica y de la distancia del cilindro al cuerpo inductor; pero siempre está más cerca de la extremidad cercana al inductor.

3°. Apenas cesa la influencia, las dos electricidades se recombinan y el cuerpo vuelve al estado neutro. En efecto, apenas se aleja A del

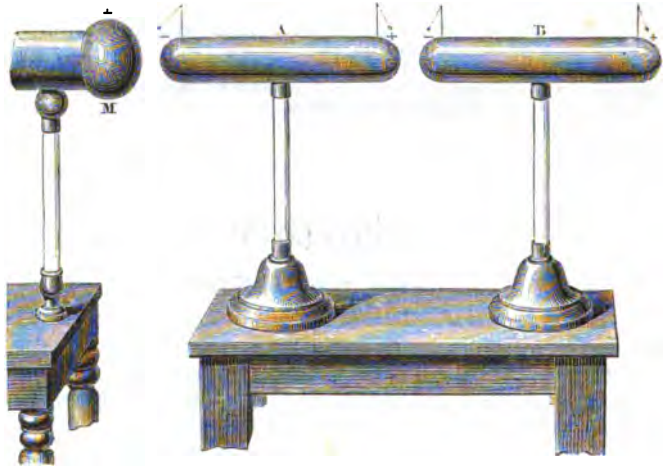


Fig. 749.

inductor, ó si se neutraliza la acción de éste, los péndulos vuelven á su posición primitiva.

Esto prueba también que las cargas eléctricas, positiva y negativa, en los dos extremos del cilindro, eran equivalentes.

4°. Cuando el conductor está todavía electrizado por influencia, si se le toca *en uno cualquiera de sus puntos* con un vástago metálico ó con el dedo, *la electricidad de mismo nombre que la del inductor se pierde en el suelo y la de nombre contrario es retenida por el inductor*. Así, en el cilindro A queda la electricidad negativa, ya se toque la extremidad positiva, la negativa ó la parte media.

5°. *Inducciones sucesivas.* — Un cuerpo electrizado por influencia ejerce acción á su vez sobre los conductores cercanos para separar en ellos las dos electricidades; esto es lo indicado por la disposición de los signos + y — en un segundo cilindro B colocado después de A.

6°. *Teoría.* — La teoría de Symmer permite darse cuenta fácilmente de los pormenores de este fenómeno. Es posible explicarlos y calcularlos rigurosamente considerando la influencia como un caso particular de la distribución de la electricidad en un conductor colocado en un campo eléctrico determinado.

OBSERVACIONES. — 1°. Siguiendo una *línea de fuerza*, se ve que la electricidad negativa aparece en la superficie en el punto á donde llega la línea, y que la electricidad positiva aparece en el punto de donde la línea se aleja.

Es además evidente que las líneas de fuerza encuentran *normalmente* la superficie de un conductor electrizado en equilibrio, puesto que esta superficie es *equipotencial*.

2°. Se ha objetado al aparato de Æpinus que no demuestra la electrización de la extremidad más cercana al foco, puesto que la divergencia del péndulo correspondiente podría explicarse por la atracción directa de éste.

Pero el método del plano de prueba, que es independiente de las indicaciones de los péndulos, permite contestar á todas los objeciones.

842. **Cantidad de electricidad inducida : teorema de Faraday.** — La cantidad de electricidad inducida depende al mismo tiempo de la carga del inductor y de la extensión de superficie del inducido

Fig. 750.

que está frente al inductor, es decir, de la utilización de las líneas de fuerza del campo eléctrico inductor. En el caso particular de que el inductor envuelva completamente al inducido, esa cantidad

se determina por el teorema siguiente, que se debe á Faraday :

Un cuerpo conductor electrizado, rodeado completamente por otro conductor, induce sobre la cara que tiene enfrente una cantidad de electricidad contraria, que es igual á su propia carga.

Demostración : Experimento del cilindro de Faraday. — 1°. Se toma un cilindro metálico hueco C (fig. 750, I), dispuesto sobre una placa de parafina P y que comunica, por el alambre *f'*, con un electroscopio lejano E. Después se hace bajar lentamente á la cavidad una bola electrizada, positivamente por ejemplo, y suspendida de un vástago aislador. En seguida el doble péndulo diverge, indicando una carga positiva, conforme á las leyes de la inducción. La magnitud de la divergencia indica á cada instante la de la carga inducida. Obsérvase que la separación empieza por aumentar á medida que la bola baja. Desde que la tapadera *c* cierra el cilindro, como el inductor queda envuelto por entero, la divergencia permanece constante, lo cual prueba que la carga inducida ha alcanzado su máximum. La divergencia no aumenta más cuando la bola llega á ponerse en contacto de las paredes; ahora bien, en este punto las electricidades contrarias de la bola y de la pared interna se recombinan. Si la carga inductora fuera superior á la negativa inducida, el exceso iría en parte á unirse con la carga positiva del electroscopio, y aumentaría su divergencia. Si por el contrario esta carga fuera inferior, lo que pasaría en parte sobre la bola, es el exceso de E : entonces la divergencia disminuiría y se retiraría la bola aun electrizada. Pero no ocurre nada de esto : luego la carga inducida era igual á la inductora á partir de la posición en que la cavidad cilíndrica quedó cerrada.

2°. Si se repite el mismo experimento después de haber introducido C en un segundo cilindro C' (fig. 750, II) aislado del primero por un disco de parafina P y por un soporte I de pies de vidrio, destinado á recibir el cuerpo inductor, se observa que el electroscopio no sufre acción ninguna, con tal que se tenga cuidado de poner á C' en comunicación con el suelo por medio de la cañería T. Esto prueba que en el caso de que lo inducido *esté en el suelo*, las cargas interiores (inductora é inducida) son equivalentes y están distribuídas de modo que no produzcan en lo exterior sino un *campo nulo*.

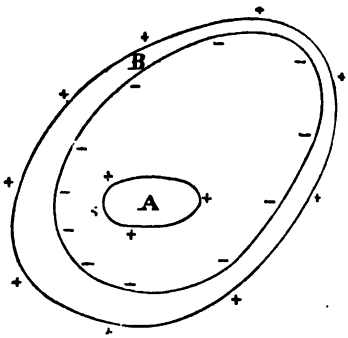


Fig. 751.

3°. *Teoría.* — Si se introducen conductores electrizados A dentro de otro hueco B, una vez establecido el equilibrio eléctrico, el campo es nulo en todo el grosor de B (fig. 751). El flujo relativo á

una superficie cualquiera S trazada en el grueso del conductor, es pues necesariamente nulo, y puesto que tiene como valor $4\pi \Sigma m$, precisa que Σm sea nulo, lo cual exige que haya tanta electricidad atraída sobre la superficie interior como la que se introdujo; además, las cargas influyentes é influídas deben ser de signos contrarios. La carga que pasa á la superficie exterior es por tanto igual á la carga inductora y de mismo signo.

843. **Influencia de una superficie electrizada cerrada sobre un punto interior.** — La recíproca del teorema de Faraday no es exacta: en efecto, en el caso de que el inductor envuelva enteramente al inducido, *no hay inducción*, puesto que una capa eléctrica cualquiera, en equilibrio sobre un conductor, produce un campo interior *nulo*. Este hecho podría demostrarse directamente por medio del aparato anterior (fig. 750).

Observación. — Este hecho permite explicar, *en el caso de un conductor inducido que envuelve completamente al inductor* porqué *la carga interna del inducido no varía cuando se le pone en comunicación con el suelo.*

En efecto, así no se hace desaparecer del inducido más que la electricidad de signo idéntico á la carga del inductor. Ahora bien, como esta electricidad forma una capa en equilibrio en la superficie externa del inducido, no ejerce acción ninguna sobre un punto interior: su desaparición no puede en consecuencia producir efecto ninguno sobre la carga inducida de la cara interna.

844. **Consecuencias del teorema de Faraday.** — 1°. *Adición de las cargas.* — De esta manera se tiene medio de efectuar la *suma algébrica* de cargas eléctricas dadas. Basta introducirlas en el cilindro C: la carga exterior de éste es igual á la suma algébrica de las cargas introducidas, y la carga interna se mide por esta suma algébrica tomada con signo contrario. En general, todo fenómeno que diera origen á cantidades equivalentes de las dos electricidades y que se realizara dentro de la cavidad, dejaría en el cero las hojas *ff* del electroscopio.

2°. *Pantalla eléctrica.* — Cuando el inducido C' ha sido puesto en comunicación con el suelo, no quedan en el sistema sino las cargas iguales y contrarias que están en presencia. Sus acciones sobre un punto exterior al sistema son iguales y de signo contrario según la segunda experiencia (fig. 750), y por consiguiente, tienen una resultante nula, puesto que el conductor C no experimenta la influencia del sistema.

De consiguiente, si se envuelve un conductor electrizado por un conductor metálico que comunique con el suelo, se suprime la influencia de este cuerpo sobre los puntos exteriores al conductor, sin necesidad de descargar éste. Así se realiza un *campo eléctrico rigurosamente limitado* á la pared externa del conductor.

Vese que esta envoltura conductora desempeña respecto de la electricidad el mismo papel que una superficie opaca con la luz; por esto se llama algunas veces *pantalla eléctrica* á ese conductor envolvente. Esa pantalla protege también al conductor envuelto contra las acciones eléctricas *exteriores*: así es que la mayor parte de los aparatos de medida electrostáticos están rodeados por envolturas metálicas.

845. **Influencia sobre los cuerpos malos conductores; penetración en su masa.** — Se ha visto que los cuerpos buenos conductores se electrizan *instantáneamente* por influencia; no ocurre lo mismo con los malos conductores, pero su acción es muy lenta y escasa. Además, la electrización sigue efectuándose, mas el aislador no queda electrizado en su superficie, si bien su masa parece penetrada por la electricidad, hasta cierta profundidad.

Experiencia de Faraday. — Faraday demostró este hecho de la manera siguiente: tomó un pedazo grueso de blanco de ballena C (fig. 752) y aplicó á sus caras dos finos platillos de latón, que comunicaban, por medio de dos cordones, uno con un foco de electricidad positiva y otro con el suelo. Después de diez minutos de contacto próximamente con el foco, se retiran los dos cordones y se observa que los platillos están electrizados, el primero positivamente y negati-

vamente el segundo. De ahí se debe deducir que la electricidad del foco había penetrado en el blanco de ballena, mientras que en la cara opuesta penetraba la

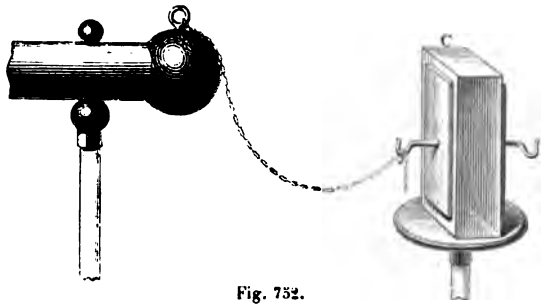


Fig. 752.

electricidad negativa atraída por influencia, y que estas electricidades son las que reaparecen en los platillos.

846. **Comunicación de la electricidad á distancia. — Descarga disruptiva y descarga conductiva.** — En el experimento fundamental de la inducción (fig. 749), las electricidades contrarias del conductor y del cilindro tienden á reunirse, y no se mantienen en la superficie de estos dos cuerpos sino por la resistencia del aire. Si esta resistencia disminuye ó si la tensión eléctrica aumenta, ésta vence á la primera y ambos fluidos se recombinan á través del aire : la recomposición viene acompañada de ruido seco y de una chispa más ó menos viva. Quedando neutralizada de este modo la electricidad negativa del cilindro por la positiva que el foco le ha cedido, sólo queda en el primero electricidad positiva, que por lo demás conserva, aunque la influencia cese.

Cuanto á la *distancia explosiva*, varía con el potencial, la forma de los cuerpos, su poder conductor, y el aislamiento de los medios interpuestos.

La descarga que se produce con chispa y con ruido se designa por el nombre de *descarga disruptiva*, para distinguirla de la *descarga silenciosa* ó *conductiva* que se opera, pongamos por ejemplo, entre un cuerpo electrizado y el suelo, cuando están unidos por un conductor.

847. **Movimientos de los cuerpos electrizados.** — Los movimientos de atracción y de repulsión que se producen entre los cuerpos electrizados se explican fácilmente por la influencia electrostática. En efecto, sea un cuerpo fijo M (fig. 753) que supondremos electrizado positivamente, y otro móvil N, situado á pequeña distancia del primero; se pueden considerar tres casos.

1°. *El cuerpo móvil es conductor y se encuentra en estado neutro.* — El cuerpo M, actuando por influencia sobre la electricidad neutra del cuerpo N, atrae la negativa y rechaza la positiva, de manera que la densidad máximum de las dos electricidades se efectúa respectivamente en los puntos *a* y *b*. Pero la atracción entre los puntos *a* y *c* supera á la repulsión entre los puntos *b* y *c*, y el cuerpo móvil, *si es suficientemente ligero*, se acerca al cuerpo fijo por efecto de una resultante igual al exceso de la fuerza atractiva sobre la repulsiva. Y si el hilo de suspensión es conductor, sólo persistirá la atracción.

2°. *El cuerpo móvil es conductor y está electrizado.* — Si el cuerpo móvil está cargado de electricidad contraria á la del cuerpo M, hay también atracción; si está cargado de la misma electricidad, hay repulsión para cierta distancia. Pero más cerca puede haber atracción. En efecto, á más de la electricidad libre que ya contiene el cuerpo móvil, también la tiene neutra y como ésta se descompone por la influencia positiva del cuerpo M, el hemisferio *b* recibe nueva cantidad de electricidad positiva, mientras que el hemisferio *a* se carga de electricidad negativa; hay pues, como en el caso precedente, atracción y repulsión. La segunda fuerza empieza por ser superior á la primera, porque la cantidad de electricidad positiva sobre el cuerpo N es mayor que la de electricidad negativa; pero á medida que el intervalo *ac* disminuye, la fuerza atractiva crece más de prisa que la repulsiva, y puede acabar por ser superior á ésta.

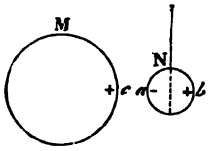


Fig. 753.

3°. *El cuerpo móvil es aislador y está electrizado.* — Entonces el cuerpo móvil es rechazado ó atraído, según que se encuentre cargado de la misma electricidad que el fijo, ó de electricidad contraria. Si está primeramente en su estado natural, su fluido neutro puede ser descompuesto á la larga por la influencia del cuerpo M, con tal que este último se encuentre suficientemente electrizado y entonces hay atracción.

848. **Teoría de la influencia electrostática.** — En general un conductor no está aislado, sino que se encuentra en un campo eléctrico y sometido á su influencia. En este caso su potencial depende al mismo tiempo de su carga propia y de las masas eléctricas diseminadas en el campo, y sea en la superficie de otros conductores electrizados, sea en el suelo ó las paredes del laboratorio: hay pues que tener en cuenta estas masas en el cálculo del potencial. Sean pues $\left(\frac{q}{r}+\frac{q_1}{r_1}+\ldots\right)$ la suma de los términos relativos á la carga propia del conductor $\left(\frac{q'}{r'}+\frac{q'_1 r}{r'_1}+\ldots\right)$ la suma de los términos relativos á las masas eléctricas del campo; en el caso general se tiene

$$V=\Sigma\left(\frac{q}{r}\right)+\Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right).$$

Supongamos que todas las masas q' estén reunidas en un conductor único B, (fig. 754). Si B está cargado *positivamente*, el potencial en A será mayor que si A estuviera aislado, y será tanto mayor cuanto más cercano está B, pues entonces $\Sigma\frac{q'}{r'}$ está formado de términos positivos, tanto mayores cuanto más pequeñas son las distancias r'. Si B está cargado *negativamente*, el potencial de A disminuirá por efecto de la proximad de B, y tanto más cuanto más cerca esté B, pues entonces los términos $\frac{q'}{r'}$ son todos negativos y tanto mayores, en valor absoluto, cuanto más pequeñas son las distancias r'.

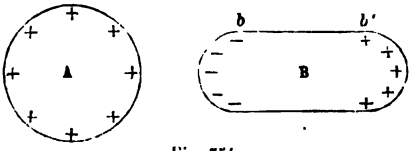


Fig. 754.

Si B se encuentra en *estado neutro*, sufre el *fenómeno de influencia* (fig. 754) desde que está suficientemente cercano á A; su fluido neutro es descompuesto, el negativo atraído á la región inmediata de A y el positivo rechazado en cantidad igual á la región opuesta. De ahí resulta: 1°. que el potencial, que era primeramente nulo en B, adquiere cierto valor positivo; 2°. que el potencial disminuye en A, pues el fluido negativo de B actúa en A á menor distancia que el fluido positivo, y en consecuencia la suma $\Sigma\left(\frac{q'}{r'}\right)$ es una suma algébrica en que los términos positivos son mayores que los negativos.

Si se pusiese un punto cualquiera de B en comunicación con la tierra, su

potencial se haría igual al de la tierra, esto es *nulo*, y el potencial de A disminuiría un poco (por causa de la desaparición de los términos positivos que en la suma $\Sigma \frac{q'}{r'}$ correspondían al fluido positivo de la extremidad *b*').

CAPÍTULO VI

CONDENSACIÓN DE LA ELECTRICIDAD.

ESTUDIO ELEMENTAL Y TEORÍA.

849. **Condensación y condensadores.** — Se da el nombre general de *condensadores* á ciertos aparatos que sirven para acumular cantidades considerables de electricidad en superficies relativamente pequeñas. El fenómeno de la condensación no es sino un caso particular de la influencia eléctrica. Es fácil ponerlo de manifiesto experimentalmente.

Si se carga por medio de la máquina eléctrica un platillo metálico B (fig. 755), aislado y distante de todo conductor, se observa cierta separación, sea en un péndulo solidario de él, sea en las hojas de oro

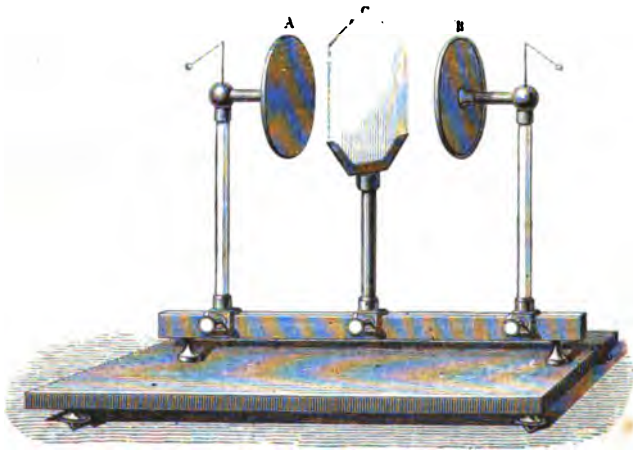


Fig. 755.

de un electroscopio cuando se le ha enlazado metálicamente con el conductor. Si entonces se acerca poco á poco á B otro conductor aislado A, hallándose en reposo la máquina, se ve que disminuye cada vez más la separación del péndulo. Si se hace funcionar de

nuevo la máquina, se restablece en el electroscopio la separación primitiva; y si en seguida se aleja A después de haber suprimido el manantial de electricidad, se observa una separación mucho más considerable. Luego, cuando se carga el platillo B en presencia de A, permaneciendo idénticas las demás condiciones, la carga adquirida es mayor que cuando se carga B en ausencia del platillo A.

Obsérvase que el efecto de la condensación es tanto mayor cuanto más extensas son ó más cercanas están las superficies A y B opuestas. Las sustitución de una lámina de vidrio ó de azufre en vez del aire aumenta todavía más la condensación.

Esta disposición experimental, esencialmente compuesta de *dos cuerpos conductores separados por otro aislador*, constituye un *condensador*. Los distintos condensadores no se distinguen entre sí más que por la forma y las dimensiones de los conductores y por la naturaleza del aislador.

850. **Condensador de Æpinus.** — El precedente es el *condensador de platillos* imaginado por Æpinus. Está formado de dos platillos de latón A y B (fig. 755), y una lámina de vidrio C que los separa. Cada uno de los platillos está provisto de un pequeño péndulo eléctrico de hilo conductor de cáñamo y ambos se encuentran aislados en dos columnas de vidrio cuyos pies pueden moverse y apartarse uno de otro á lo largo de una regla que les sirve de sostén.

1°. *Carga.* — Para *cargar* el condensador se llevan los platillos hasta ponerlos en contacto con la lámina de vidrio (fig. 756); después, por medio de cordones metálicos, se hace comunicar uno de ellos, por

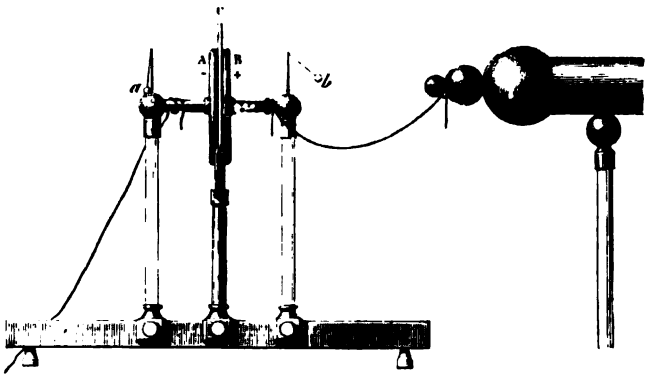


Fig. 756.

ejemplo B (*colector*), con un manantial de electricidad, y el otro A (*condensador*) con el suelo. Cuando el péndulo *b* del colector ha alcanzado su separación *máxima*, se dice que el condensador está cargado á *hartura*; entonces se rompen las comunicaciones con la máquina y con el suelo, retirando los cordones metálicos. En ese instante está

el colector cargado *positivamente*, como el manantial y el condensador lo están negativamente ; pero el péndulo de este último *no diverge*. Más adelante explicaremos este hecho : á veces se le expresa diciendo que en el condensador no hay *electricidad libre* ó que está *disimulada*.

2°. *Descarga.* — Ahora se puede descargar el condensador de dos modos, sea lenta, sea instantáneamente.

Descarga lenta. — Tócase con el dedo primero el colector B y se saca una chispa : entonces se ve que cae el péndulo *b*, mientras *a*, que había permanecido vertical, empieza á divergir (fig. 756). Si ahora se toca el platillo A, se saca otra chispa, lo que hace caer *a* y levantarse *b*. Continuando estos contactos alternos, se puede obtener una serie más ó menos larga de chispas cada vez más débiles. Así la descarga se opera con mucha lentitud, y si el aire está seco, puede exigir varias horas. No tendría éxito si se empezara por tocar el platillo A.

Descarga instantánea — Se toma un *excitador*, pequeño instrumento formado por dos arcos de latón, terminados en bolas del mismo metal y reunidos por un gozne. Cuando los arcos están provistos de mangos aisladores de vidrio (fig. 757), es un *excitador de mangos de vidrio;* si no hay mangos (fig. 760), es un *excitador simple*. Aplícase una de sus bolas sobre uno de los platillos del condensador y se acerca progresivamente la otra bola al segundo platillo ; entonces salta una fuerte chispa, que proviene de la recomposición de las electricidades contrarias acumuladas en las dos caras del condensador : esta es la descarga *instantánea*.

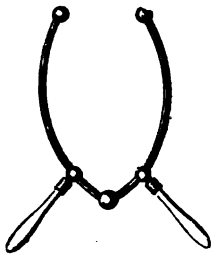


Fig. 757.

Observación. — Si se tocaran con una mano uno de los platillos y con otra el segundo, la recomposición se efectuaría por los brazos y el cuerpo del operador, que sentiría entonces conmoción más ó menos violenta.

Descargas secundarias. — Sin embargo, el condensador no queda nunca enteramente descargado por esta primera descarga ; toda vez que aun se puede, al cabo de corto intervalo, obtener del mismo modo una segunda, otra tercera y aun más, pero que son cada vez más débiles. Estas descargas sucesivas reciben el nombre de *descargas secundarias*.

Proceden de la electricidad que se ha desarrollado lentamente por influencia, penetrando hasta pequeña profundidad en las dos caras del aislador: cuando los platillos han sido descargados por primera vez reaparece esa electricidad y los carga de nuevo.

3°. *Límite de la carga.* — Ya demostraremos (860, 1°) que la carga de un condensador es *proporcional á la diferencia de potenciales de los polos del manantial eléctrico y en la superficie de los platillos, é in-*

versamente proporcional al grueso de la lámina aisladora. En todos los casos está limitada por dos causas: 1°. el potencial en el colector acaba por ser igual al del foco, y entonces éste no puede seguir comunicando electricidad al condensador; 2°. cuando la tensión de las dos electricidades contrarias acumuladas es superior á la resistencia del aislador que las separa, se recombinan á través de la lámina, casi siempre agujereándola.

4°. *Condensador de lámina de aire.* — Este aparato no se distingue del anterior más que en la supresión del platillo de vidrio. La lámina aisladora está sencillamente constituída por la capa de aire interpuesta entre los dos platillos metálicos.

851. **Cuadro fulminante.** — El *cuadro fulminante*, debido á Franklin, es un condensador más sencillo que el de Æpinus (fig. 758). Está formado por un cuadro de vidrio ordinario, rodeado por un marco de madera y en cuyas caras se pegan, una

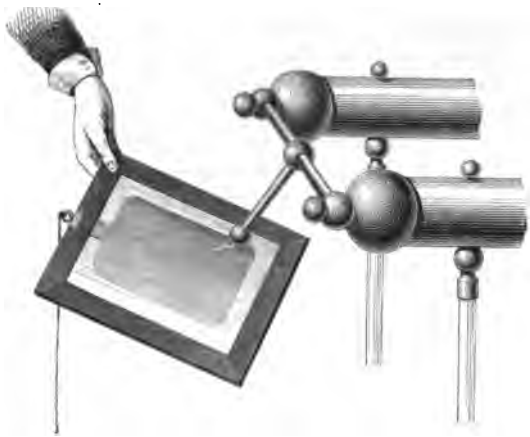


Fig. 758.

frente á otra, dos hojas de estaño que dejan entre sus bordes y el marco un intervalo de 6 cm. próximamente. Una de ellas está aislada por los bordes del marco y la otra se pone en comunicación con el suelo por medio de una pequeña cinta de estaño, que llega hasta un anillo de donde se cuelga una cadena.

Para cargar el cuadro fulminante se presenta al foco la hoja de estaño aislada, mientras que la otra se *une con la tierra.* Se le puede descargar, ya por medio del excitador simple, ya más cómodamente con las dos manos; en este último caso se recibe una fuerte conmoción.

852. **Botella de Leyden.** — La *botella de Leyden* es el más antiguo de los *condensadores* [1]. Compónese de un frasco de vidrio delgado y de diverso tamaño. El interior está lleno de hojas de oro batido ó de oro musivo; en la pared exterior se pega una hoja de estaño B, que también cubre el fondo; pero que deja desnudo el vidrio hasta

1. Se le llama así por la ciudad donde la inventó el año 1746 Musschenbroek ó su discípulo Cuneo. Franklin expuso su teoría, haciendo ver que es un condensador como el cuadro fulminante.

distancia bastante grande del gollete (fig. 759). Por un tapón de corcho adaptado al cuello pasa, bien ajustada, una varilla de cobre encorvada en forma de garfio, que termina en una bola A exteriormente, é interiormente por una punta en contacto con las hojas de oro. Estas hojas constituyen la *armadura interior* ó *interna*, y la hoja de estaño B la *armadura exterior* ó *externa*. Corresponden á los dos platillos, colector y condensador, del condensador de Æpinus.

Fig. 759.

Carga. — La botella de Leyden se carga, como todo condensador, poniendo una de las armaduras en comunicación con el suelo y la otra con un manantial eléctrico. Para ello se la coge con la mano por la armadura exterior, mientras se presenta la bola de la armadura interior á uno de los polos de una máquina eléctrica, que tiene el otro en el suelo.

Descarga. — Puede ser *lenta* ó *instantánea*. Para obtener la primera, se coge la botella con la mano y se ponen en comunicación las dos armaduras por medio de excitador simple. Hay que tener cuidado de tocar *primero* la armadura que se tiene en la mano, pues si no, se recibe la conmoción (fig. 760). Para descargarla lentamente, se la aisla sobre una torta de resina, y se tocan alternativamente, con la mano ó con un vástago metálico, primero la armadura interior, después la exterior, y así sucesivamente: de este modo se saca en cada contacto una chispa cada vez más débil.

Fig. 760.

Experiencia. — La descarga lenta se realiza de manera curiosa por una antigua experiencia clásica (fig. 761). El vástago de la armadura interna es recto y está provisto de un timbre *d*; cerca de la botella se encuentra fija otra columna metálica, que comunica con la armadura externa y sostiene un timbre *e* análogo al primero, y un péndulo eléctrico constituído por una bola de cobre que cuelga de un hilo de seda. Una vez cargada la botella, se la coloca sobre la peana *m*. Como entonces la armadura interna contiene un exceso de electricidad libre, el pén-

dulo es atraído y va á chocar con el timbre de la botella; rechazado inmediatamente, va á chocar con *e* y le cede su electricidad; pero vuelto al estado neutro, es atraído de nuevo por el timbre *d*, y así sucesivamente. Este vaivén puede durar algunas horas, si el aire está seco y la botella es algo grande.

Fig. 761.

853. **Distribución de la carga: experiencia de Franklin.** — Franklin demostró por una experiencia directa que en la botella de Leyden, como en todos los condensadores, no sólo se electrizan las dos armaduras, sino también y principalmente las dos caras del aislador que las separa. Para esto se valió de una botella de Leyden de las llamadas *de armaduras móviles*, porque es posible separar sus distintas piezas. Está constituída por la reunión de un vaso cónico de vidrio B (fig. 762), de una armadura exterior de latón C, y de una armadura interior de la misma sustancia D (fig. 762, A). Después de haberla electrizado como la botella ordinaria, se la aisla sobre una torta de resina; entonces se retira con la mano la armadura interior, después el vaso de vidrio, luego la armadura exterior, y se

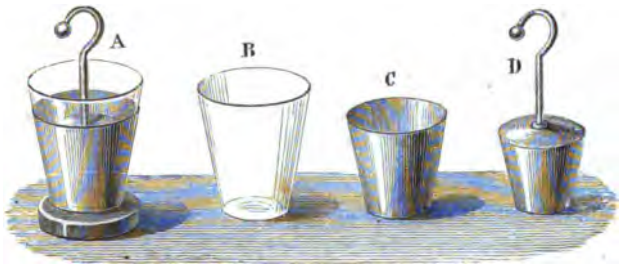


Fig. 762.

colocan estas piezas unas al lado de otras (fig. 762, B, C, D). Ahora bien, las dos armaduras han vuelto al estado neutro por efecto del contacto con la mano del operador. Sin embargo, si se reconstituye la botella de Leyden, puede sacarse de ella una nueva chispa, casi tan fuerte como si no se hubieran descargado las dos armaduras.

Es posible producir varias *descargas secundarias* sucesivamente. La explicación que de ellas hemos dado se confirma por esta experiencia.

854. **Jarras y baterías eléctricas.** — Dase el nombre de *jarra eléctrica* á una botella de Leyden de gran tamaño (fig. 768) y de ancho gollete; en su cara interna se pega una hoja de estaño que sirve de

armadura interior. El vástago que atraviesa el tapón es recto y ternima en la parte inferior en una cadena metálica que lo pone en comunicación con la hoja de estaño; la armadura interior está constituída por otra hoja de estaño pegada exteriormente sobre el vidrio.

Una *batería eléctrica* es la reunión de varias jarras colocadas en una caja de madera (fig. 763 y 764), que comunican unas con otras, interiormente por los vástagos de metal, y exteriormente por una hoja de estaño que cubre el fondo de la caja y está en contacto con

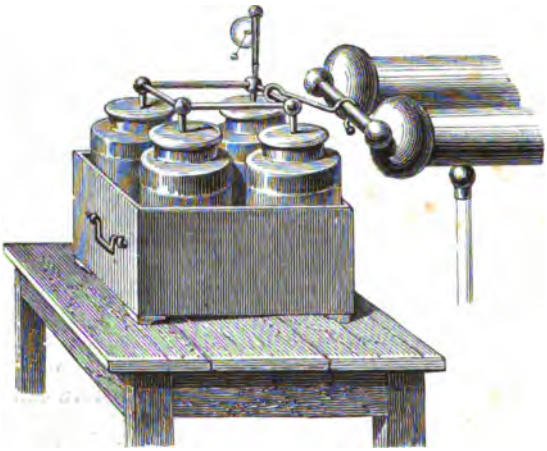


Fig. 763.

las armaduras externas de las jarras. Esta hoja se prolonga lateralmente hasta encontrar dos abrazaderas metálicas fijas en las paredes de la caja. Una batería viene á ser una botella de Leyden de gran superficie.

Observación. — También se hacen baterías con condensadores formados de láminas de mica plateada, de cuadros de Franklin convenientemente dispuestos ; las hojas de estaño pueden estar pegadas sobre hojas de papel parafinado ó de mica. Estos condensadores se disponen con frecuencia en cajas que tienen aspecto exterior de prismas de resistencia.

Carga. — Pónense en comunicación las armaduras internas con uno de los polos de una máquina eléctrica, hallándose el otro unido al suelo; las armaduras externas van también á dar con la tierra. por medio de una cadenita atada en una de las abrazaderas de la caja. Un electroscopio de cuadrante, colocado sobre una de las jarras, indica la marcha de la operación: la aguja no diverge sino lentamente y escaso número de grados, porque la separación no ocurre más que en virtud de la diferencia de potenciales que se produce entre las armaduras. El número de jarras es en general de cuatro,

seis ó nueve. Mientras mayores y más numerosas son más tiempo se necesita para cargar la batería; pero también son más poderosos sus efectos.

Descarga. — Se ponen en comunicación las dos armaduras entre sí por medio de un excitador, teniendo cuidado de tocar primero la armadura externa. Hay que hacer uso del excitador de mangos de vidrio y tomar todas las precauciones necesarias para evitar la conmoción, que podría ser muy peligrosa, pues una fuerte batería causa graves accidentes.

Observaciones. — 1°. Conviene colocar los aparatos que puede ser necesario tocar en la parte del circuito de la botella en comunicación con el suelo. Operando así no hay peligro de sufrir las descargas.

2°. *Uso del excitador universal.* — Llámase así una pequeña caja de madera con dos columnas de vidrio (fig. 764), donde están fijos por

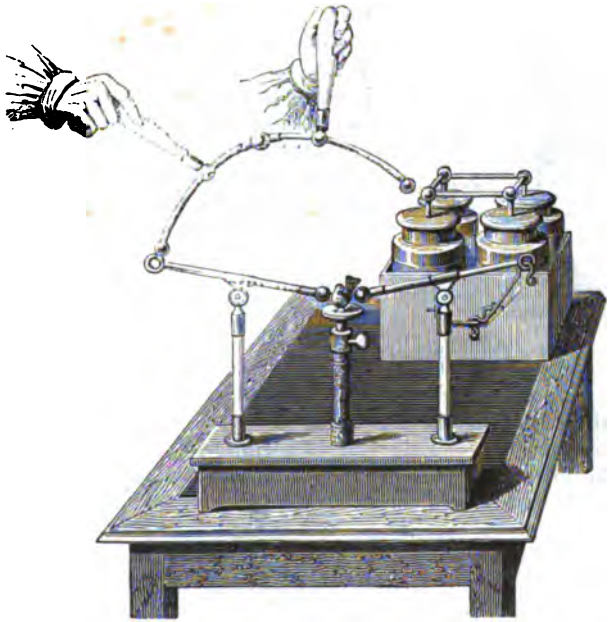


Fig. 764.

medio de goznes vástagos de cobre aisladores que comprenden entre sí un pequeño platillo montado en un pie de madera; ahí es donde se coloca el objeto ó el animal con que se trata de experimentar. Dirigidos hacia ese objeto los dos vástagos de cobre, se pone en comunicación uno de ellos con la armadura exterior de la batería y la otra con una de las bolas del excitador de mangos de vidrio. Si entonces

se acerca la segunda bola hacia la armadura interior, salta una chispa entre esta bola y la armadura, y otra entre los brazos del excitador universal : esta última es la que atraviesa el objeto colocado en el platillo.

855. **Batería en cascada.** — También se pueden asociar condensadores, de modo que la armadura interior de uno de ellos comunique con la exterior del siguiente : así se forma una *batería en cascada* (fig. 765). Pronto demostraremos (860) que la capacidad del sistema formado por n botellas idénticas es entonces la enésima parte de la capacidad de una sola botella, y en cada botella la diferencia de potencial es la n^a parte de la de las armaduras extremas.

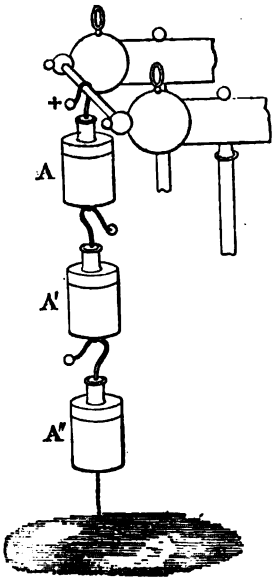


Fig. 765.

856. **Electroscopio condensador de Volta.** — El *electroscopio condensador*, imaginado por Volta, no es más que el electroscopio de hojas de oro (885), hecho mucho más sensible por la adición de un condensador. El vástago de cobre que sostiene las pequeñas hojas de oro termina, en la parte superior, no por una bola de latón, sino en un disco del mismo metal en que puede aplicarse otro análogo, provisto de un mango de vidrio. Ambos discos están cubiertos por una capa de barniz de goma laca que los aisla : el conjunto de los platillos metálicos y del barniz aislador constituye un *condensador*.

Funcionamiento. — Este aparato permite, no medir, sino poner de manifiesto la existencia de ciertos focos de electricidad de escaso potencial, que no ejercerían acción sobre el electroscopio de hojas de oro. Pónese en comunicación con el platillo inferior que sirve de *colector* uno de los polos del foco, y el superior con la *tierra*, tocándolo con el dedo mojado (fig. 766) : entonces las dos electricidades se acumulan en los dos platillos. Cargado de esta manera el aparato, se retira primero el dedo, y después el foco eléctrico, sin que todavía se observe divergencia alguna ; pero si se retira el platillo superior (fig. 767), la electricidad del otro, que es de la misma especie que la del polo utilizado del foco, se difunde entonces por el vástago y las hojas de oro y éstas divergen claramente.

Auméntase la sensibilidad adaptando al pie del aparato dos vástagos de cobre terminados en bolas del mismo metal que, al electrizarse por la influencia de las hojas de oro, actuán sobre ellas

y aumentan su separación. Mejórase mucho el aparato adaptándole además el tapón-soporte de parafina de M. Boudréaux (818).

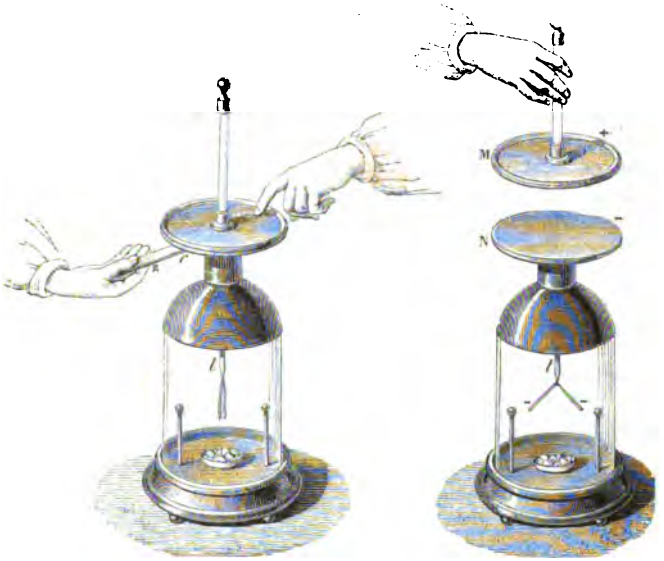


Fig. 766. Fig. 767

857. **Botella de Lane** ó **Electrómetro de descargas.** — Llámase *botella de Lane* á una botella de Leyden dispuesta de modo que se

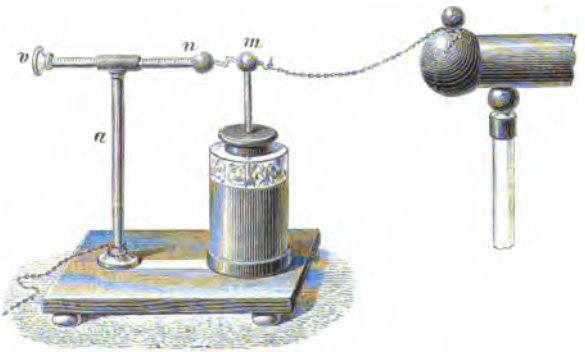


Fig. 768.

midan las cargas: este aparato permite comparar el rendimiento de máquinas eléctricas potentes, como las de Holtz, de Wimshurst, etc.

La armadura interna es puesta en comunicación por medio de un

cordón metálico con el foco eléctrico (fig. 768). La botella descansa sobre un platillo de latón por su armadura externa; ésta comunica, por una lámina y un vástago *a* de latón, con un botón *n*, que se puede acercar más ó menos á la armadura interna de la botella.

Cuando la diferencia de los potenciales en los dos botones *m* y *n* ha llegado á ser bastante grande para vencer la resistencia del aire, saltan de uno á otro chispas sucesivas y descargan la botella: para una misma distancia de los dos botones, el número de las chispas en la unidad de tiempo es proporcional á la cantidad de electricidad proporcionada por el foco. Esta botella hace veces de una especie de aforador para medir la electricidad que sale del foco: entonces la unidad de medida es la cantidad de electricidad que se desprende á cada chispa; esa unidad varía con la *capacidad eléctrica* de la botella y con su *distancia explosiva* (separación de los botones).

858. **Teoría de la condensación eléctrica. — Caso del condensador esférico.** — La condensación eléctrica no es sino un fenómeno de influencia que ocurre cuando el inductor A está mantenido á un potencial constante, por una comunicación *lejana* con un foco eléctrico de potencial constante V, y que el inducido B está mantenido á un potencial nulo por una comunicación permanente con el suelo.

El caso más sencillo es el del *condensador esférico*, que es teóricamente el más perfecto de los condensadores.

1°. *Explicación del fenómeno.* — Sea A el inductor esférico de radio ρ, y B otra esfera metálica mayor, de radio R, concéntrica á la primera, aislada de ella y

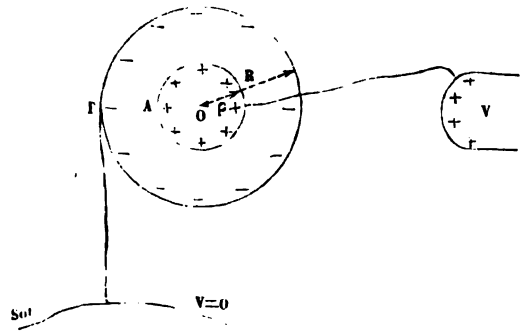


Fig. 769.

que comunica con el suelo. Esta esfera toma por inducción una carga negat — Q, igual, en valor absoluto, á la carga positiva + Q del inductor, y es mantenida al potencial cero (fig. 769).

Pero es posible calcular directamente el potencial de la armadura interna en función de su carga. Estando la capa eléctrica en equilibrio en el conductor, el potencial es idéntico en todo punto de éste; basta pues calcularlo para su centro Teniendo en cuenta al mismo tiempo las cargas distribuidas en la esfera A (que están todas á la distancia ρ del punto O) y las cargas distribuidas en B (que están todas á la distancia R, se tiene

$$V = \Sigma \frac{q}{\rho} - \Sigma \frac{q'}{R}.$$

Pero

$$\Sigma \frac{q}{\rho} = \frac{\Sigma q}{\rho} = \frac{Q}{\rho} \quad \text{y} \quad \Sigma \frac{q'}{R} = \frac{\Sigma q'}{R} = \frac{Q}{R}.$$

El potencial en el centro y por consiguiente, en la armadura misma, es pues

$$Q\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right).$$

Expresando que es igual al del foco se tiene la ecuación

$$[1] \qquad V = Q\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right).$$

Supongamos ahora que la esfera A, en vez de ser la armadura interna de un condensador, esté completamente *aislada* en el espacio. Si se la pone en comunicación con el mismo foco, quedará necesariamente al mismo potencial V: pero tomará una carga Q_1, inferior á Q. En efecto, si se calcula ahora el potencial en el centro, se halla $\frac{Q_1}{\rho}$, y se tiene la ecuación

$$[2] \qquad V = Q_1 \times \frac{1}{\rho}.$$

Ahora bien, comparando los segundos miembros de las dos ecuaciones, se ve que cada uno de ellos está formado de dos factores cuyos productos son iguales.

Como el factor $\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}\right)$ es evidentemente *más pequeño* que el factor $\frac{1}{\rho}$, resulta *por necesidad* que el otro factor Q es mayor que el Q_1. Luego, *la carga que debe comunicarse á un conductor para elevarlo á un potencial determinado es mayor cuando forma parte de un condensador que cuando está aislado.* Precisamente en esto consiste la condensación.

2°. *Otra interpretación del fenómeno.* — Según la definición de la capacidad eléctrica, si se tiene en el primer caso

$$[1] \qquad Q = CV,$$

resultará en el segundo

$$[2] \qquad Q_1 = C_1 V,$$

siendo C_1 diferente de C. Puédese en consecuencia decir también que *la condensación resulta de una modificación que se produce en la capacidad eléctrica de los conductores: la capacidad de un conductor es mayor cuando forma parte de un condensador que cuando está aislado.*

3°. *Cálculo de la capacidad del condensador esférico.* — El sistema (AB) constituye un condensador esférico absoluto, quiere decir, cuya capacidad se puede calcular.

La fórmula

$$Q = V \cdot \frac{1}{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}}$$

da efectivamente

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R}} = \frac{\rho R}{R - \rho}.$$

Se ve que teóricamente hay ventaja en acercar cuanto es posible las dos esferas.

4°. *Poder condensante.* — Es natural caracterizar un condensador por el cociente $\frac{Q}{Q_1}$ de las cargas que han de comunicarse á la armadura interna, por ejemplo, para elevarla al mismo potencial, sea cuando forma parte del condensador, sea cuando está aislada. Este coeficiente se llama *poder condensante.*

Si nos referimos á las ecuaciones [1] y [2] anteriores, se tiene, dividiéndolas miembro á miembro,

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{CV}{C_1 V} = \frac{C}{C_1}.$$

El *poder condensante* sigue siendo pues igual al cociente de la capacidad C que tiene el colector en el condensador completo, y de la capacidad C_1 del colector aislado.

5°. *Condensadores planos. — Casos particulares.* — Supongamos que la distancia $R - \rho$ de las dos armaduras permanezca constante é igual á d mientras los radios R y ρ crecen ambos indefinidamente. La capacidad por unidad de superficie de la esfera de radio ρ tiene como valor

$$C' = \frac{C}{4\pi\rho^2} = \frac{R\rho}{(R-\rho)4\pi\rho^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{R}{(R-\rho)\rho} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{4\pi d} \cdot \frac{R}{\rho}.$$

Cuando R y ρ aumentan indefinidamente, su cociente se hace igual á 1: entonces $C' = \frac{1}{4\pi d}$; pero por otra parte, entonces las dos esferas son dos planos: luego $\frac{S}{4\pi d}$ es la capacidad relativa á una superficie S de un condensador plano de placa de aire cuyas armaduras se encuentran á distancia igual á d.

859. **Poder inductor específico. — Experiencias de Faraday.** — Faraday descubrió que la capacidad eléctrica de un condensador no depende únicamente de la distancia entre las armaduras, sino que varía también con la naturaleza del cuerpo aislador interpuesto. Á este aislador es á lo que llamaba el *dieléctrico*.

Definió el *poder inductor específico* de un dieléctrico diciendo que es la razón que existe entre la capacidad de un condensador cuyas armaduras estuvieran separadas por una lámina de esta sustancia y la capacidad que tendría si se reemplazara esta última por una capa de aire del mismo grueso.

Para obtener el *poder condensante* real, hay que multiplicar el *poder condensante geométrico* por el número que representa el *poder inductor específico* de la sustancia interpuesta.

En efecto, llamando P al *poder condensante real*, C_1 á la capacidad de la armadura interna aislada, C á la capacidad de la armadura interna que forma parte del condensador de lámina de aire, y C' á la capacidad de la armadura interna que forma parte del condensador de lámina dieléctrica, se tiene idénticamente,

$$P = \frac{C'}{C_1} = \frac{C}{C_1} \times \frac{C'}{C}.$$

Pero $\frac{C}{C_1}$ es el poder condensante que resulta de la figura geométrica del aparato (sin tener en cuenta el dieléctrico), y $\frac{C'}{C}$ es precisamente el poder inductor específico tal como se le ha definido antes.

He aquí algunos de los resultados obtenidos por Faraday:

Resina.	1,77	Goma laca.	2,00
Vidrio..	1,80	Gutapercha ordinaria. . .	3,80

Cuanto á los gases, tienen todos según dicho físico el mismo poder inductor con poca diferencia, sin que lo modifiquen la temperatura ni la presión del gas.

860. **Condensadores ordinarios.** — 1°. *Botella de Leyden.* — La cantidad de electricidad no puede ser la misma en las dos armaduras, toda vez que la interna no está *completamente envuelta* por la externa. La envoltura se completa por el espacio ambiente. De ahí resulta que el observador situado entre el botón y los cuerpos inmediatos ve libre una pequeña cantidad de electricidad. Esta es la que hace divergir el péndulo del colector en el condensador de Æpinus.

De manera que á la capacidad que se debe á las dos armaduras cilíndricas habría que añadir la del botón exterior; pero de ordinario es despreciable su

valor. Una botella de Leyden cuya armadura interna tuviera una superficie A, tendría como capacidad

$$C = K\frac{A}{4\pi d},$$

si el espacio anular de grueso d está lleno por un medio de poder inductor K, siendo d muy pequeño respecto del radio de la armadura interna. Concíbese en efecto que en tales condiciones, cada uno de los elementos del condensador cilíndrico puede ser considerado como perteneciente á un condensador plano.

2°. *Baterías eléctricas.* — La capacidad de una batería ordinaria (854) es evidentemente igual á la suma de las capacidades de las jarras.

Tiénese pues

$$C = K\frac{A}{4\pi d} + K'\frac{A'}{4\pi d'} + K''\left(\frac{A''}{4\pi d''}\right) + \ldots = \Sigma K\frac{A}{4\pi d},$$

llamando A, A', A'',... á las superficies de las armaduras internas, y d, d', d''... á las distancias á la armadura externa. Ordinariamente las jarras son todas del mismo vidrio, del mismo grueso y de idéntica superficie. Tiénese pues

$$A = A' = A'' = \ldots, \qquad y \qquad C = K\frac{nA}{4\pi d},$$

siendo n el número de las jarras.

3°. *Batería en cascada.* — Los condensadores están reunidos *en cascada* cuando no es posible ir de uno á otro polo del sistema sin atravesar el dieléctrico de todos los condensadores A, A', A'' (855).

Calculemos la *capacidad del sistema*. Sean V y V' los potenciales obligatorios de las armaduras extremas, V'', V''', ..., los potenciales intermedios.

Si la armadura interna de A toma la carga + M, la armadura externa adquirirá por influencia la carga M y el potencial V''; la siguiente, que está en comunicación con la anterior, adquirirá igualmente el potencial V''' y la carga + M....

Si C, C', C'', ... son las capacidades de cada uno de los condensadores considerado solo, se tiene

$$M = C\,(V - V''), \qquad M = C'\,(V'' - V'''), \qquad M = C''\,(V''' - V''''), \ldots,$$

de donde

$$\frac{M}{C} = V - V'', \qquad \frac{M}{C} = V'' - V''', \qquad \frac{M}{C''} = V''' - V'''',$$

y de ahí por adición

$$M\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C''} + \frac{1}{C''} + \ldots\right) = V - V';$$

luego cada armadura adquiere la misma carga M que la de un condensador único cuyas armaduras fueran elevadas á los potenciales V y V' y cuya capacidad x fuera

$$x = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C'} + \frac{1}{C''} + \ldots}.$$

Si los condensadores son idénticos por la forma y el dieléctrico, se tiene $x = \frac{C}{n}$; de donde resulta que la capacidad del sistema no es más que la n^a parte de la de uno solo de los condensadores asociados.

Obsérvese que la diferencia de potencial V — V' se distribuye entonces en n partes iguales de manera que el dieléctrico de cada elemento no tiene que soportar más que la tensión $\frac{V - V'}{n}$.

En esto consiste la ventaja de ese modo de asociación.

4°. *Shunt de diferencia de potencial.* — Si se asocian en cascada dos condensadores de capacidades respectivas C y pC, la diferencia de potencial V — V' del foco se encuentra repartida en dos diferencias

$$V - V' \qquad y \qquad V'' - V$$

tales como

$$C(V - V'') = pC(V'' - V') \quad \text{de donde} \quad V - V'' = p(V'' - V')$$

y por consiguiente

$$\frac{V - V''}{p} = V'' - V'.$$

La diferencia de potencial entre las armaduras de la gran capacidad resulta ser la n^a parte de la que se establece entre las armaduras de la pequeña. Si la primera es por ejemplo la de un electrómetro sensible, se tendrá así un medio de fraccionar la fuerza electro-motora que se trata de calcular según se efectúa con las intensidades de corriente.

CAPÍTULO VII

MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

861. **Definiciones y clasificación.** — Se llama *máquinas eléctricas* á unos focos de electricidad de alto potencial, que resultan, sea del frotamiento recíproco de órganos malos conductores, sea de la influencia electrostática de órganos malos conductores *móviles* que se mueven delante de los órganos buenos conductores *fijos*.

Los manantiales de la primera categoría, muy poco usados en la actualidad, se llaman *máquinas de frotamiento*. La más conocida es la de Ramsden, dispuesta para dar más especialmente electricidad positiva. Las antiguas de Van Marum y de Nairne pertenecen á la misma familia: la primera permite obtener á voluntad fluido positivo ó negativo; la segunda da simultáneamente las dos electricidades. Entre ellas puede incluirse la curiosa máquina de Armstrong, que da electricidad á potencial elevado, por el frotamiento de gotecillas líquidas contra las paredes sólidas de tubos de boj. No describiremos más que la máquina de Ramsden, que es clásica: las otras no se emplean y sólo tienen interés histórico.

Las máquinas eléctricas de la segunda categoría se llaman *de influencia*. Son un perfeccionamiento de las anteriores y las han reemplazado por completo en la práctica. Describiremos sucesivamente el *electróforo*, que se puede incluir en esta familia, y las máquinas de Carré, de Holtz y de Wimshurst.

862. **Máquina eléctrica de Ramsden.** — 1°. *Histórico.* — La primera máquina eléctrica que se usó fué una de frotamiento debida á Otto de Guericke. Consistía en una esfera de azufre adaptada á un eje que se hacía girar con una mano mientras que la otra se apoyaba sobre la esfera y servía de frotador. Pronto se reemplazó la bola de azufre por un cilindro de resina y andando el tiempo, por otro de vidrio; pero no había más frotador que la mano.

En 1740 poco más ó menos tuvo Winkler la idea de emplear un cojín de seda relleno de crin. En la misma época recogió Bose sobre un disco de latón suspendido de dos cordones de seda la electricidad desprendida por el frotamiento.

Por fin, en 1766 sustituyó Ramsden de Londres el cilindro de vidrio por un platillo circular de la misma sustancia, que frotaba contra cuatro cojinetes. Desde entonces tuvo la máquina eléctrica la forma que se le da todavía en la actualidad.

2°. *Descripción.* — Entre dos montantes de madera (fig. 770) se encuentra un platillo circular de vidrio P, fijo por su centro á un eje que se hace girar por medio de un manubrio. Este platillo frota, según su diámetro vertical, contra cuatro *cojinetes* F, de cuero ó de

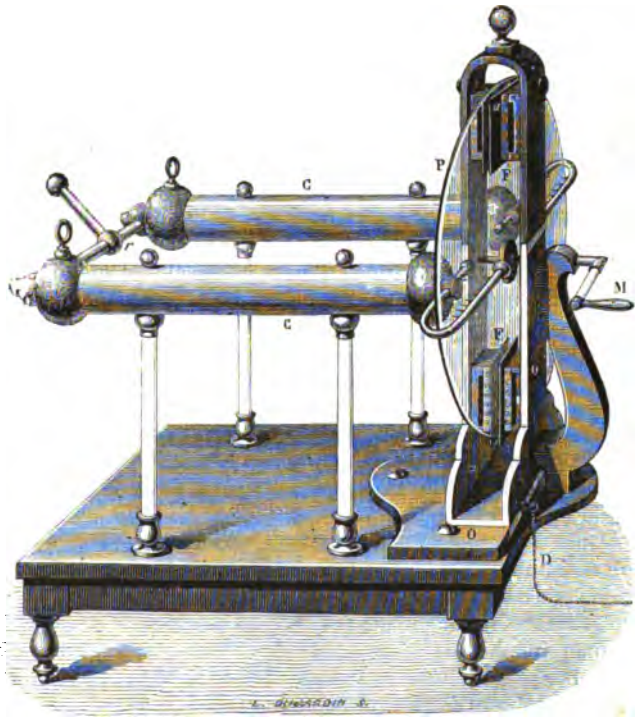


Fig. 770.

seda. Según su diámetro horizontal, pasa entre dos tubos de latón encorvados en forma de herradura, llamados *peines*, porque están armados de dientes, colocados á ambos lados dando la cara al platillo. Estos peines se encuentran sostenidos por tubos de mayor grueso C, que se llaman *conductores*, aislados sobre cuatro pies de vidrio, y que están unidos entre sí por otro tubo *r* de diámetro más pequeño. Finalmente, unas bandas de estaño O, pegadas á ambas partes de los montantes de madera que sostienen los cojines, ponen á éstos en comunicación con el suelo por medio de una cadena metálica D.

3°. *Funcionamiento y teoría.* — El platillo de vidrio frota contra los cojines al girar y los electriza negativamente, á la vez que se carga por su parte de electricidad positiva. Pero la carga negativa de los cojines se pierde en el suelo por las bandas de estaño O y la cadena D, mientras que la electricidad del platillo, que no puede escaparse, permanece sobre sus dos caras sin producir ningún efecto durante el primer cuarto de vuelta, es decir desde el cojín superior *a*F por ejemplo, hasta la mandíbula derecha. Ahí, la electricidad positiva del vidrio actúa por influencia sobre el peine y los conductores, descompone su electricidad neutra, rechaza la positiva y sustrae por las puntas la negativa, que va á reunirse con la positiva del platillo. El cuadrante que acaba de ejercer acción sobre los conductores se encuentra pues de nuevo en el estado neutro hasta que vuelve á pasar entre los cojines inferiores. Allí se electriza otra vez, y actúa después sobre el segundo peine como sobre el primero, y así sucesivamente. De manera que el platillo no cede electricidad á los conductores; se limita á *sustraer* en cierto modo la electricidad negativa, y de este modo es como quedan cargados de positiva.

Una vez cargada la máquina, si se acerca á ella la mano, sácanse chispas más ó menos fuertes, y esto mientras se da vueltas al platillo.

Inversión de la carga. — La máquina de Ramsden, dispuesta del modo expresado, da electricidad positiva; pero también puede sacarse de ella la negativa (806). Con tal fin se retira la cadena D, se aislan los pies de la mesa sobre gruesos soportes de vidrio ó de resina, y después se ponen en comunicación con el suelo los conductores C. Al dar vueltas al platillo, la electricidad positiva de los conductores se pierde en el suelo, mientras que la negativa de los cojines se difunde por los montantes de madera. En efecto, si se acerca la mano sea á una bola metálica fija en lo alto de los montantes, sea á las bandas de estaño O, se sacan de ella chispas.

4°. *Constantes de la máquina: rendimiento y diferencia de potenciales.* — La máquina de Ramsden y todas las electrostáticas están caracterizadas por dos cualidades, susceptibles de medida: su *rendimiento* y su *potencial*. Estas son las *constantes* de la máquina.

Rendimiento. — Llámase *rendimiento* á la cantidad de electricidad que la máquina emite ó *produce* en un tiempo dado (por ejemplo un segundo), ya se pongan los cojines en comunicación con el suelo y los cilindros con un conductor que se trata de cargar, ya se reunan los cojines y los cilindros por medio de un alambre, á través del cual se efectúa la recombinación de los fluidos. En este último caso, el hilo se convierte en lugar de un movimiento de las electricidades que se llama *corriente eléctrica.*

El rendimiento de una máquina de frotamiento es *proporcional* á la velocidad de rotación y á la extensión de la superficie frotada; pero *independiente* del ancho de los cojines y, hasta cierto punto, de

su presión sobre el vidrio. Hemos indicado ya (fig. 768) un medio de valorarlo con la botella de Lane.

Diferencia de potenciales. — La segunda constante es la diferencia de potencial que se establece entre los frotadores y los cilindros conductores, ó bien entre éstos y el suelo, cuando los frotadores se ponen en comunicación con la tierra: apréciasela empíricamente *por la longitud de la chispa* que puede suministrar la máquina al descargarse ó se mide por medio de un *electrómetro absoluto* (888).

Este carácter no depende en manera alguna del anterior. Mientras que una máquina electrostática de escaso rendimiento puede dar chispas muy grandes, ciertos manantiales de electricidad, como las pilas voltaicas, cuyo rendimiento es considerable, dan apenas chispas apreciables.

Por lo demás, la intensidad de los efectos caloríficos y luminosos que la chispa produce no depende sólo de su longitud. Chispas muy largas pero delgadas, tendrían poco brillo y apenas harían ruido, produciendo escasos efectos. Dada igual longitud, las chispas tienen efectos tanto más intensos cuanto más considerable es la cantidad de electricidad que pasa con la chispa.

5°. *Potencia de la máquina.* — Si la máquina es capaz de cargar n veces por segundo una botella de Lane de capacidad C, como la diferencia de potenciales entre los polos de la máquina es igual á V, produce por segundo un trabajo $W = n.\frac{CV^2}{2}$ (839): la *potencia* de la máquina es entonces, por definición, igual á $\frac{nCV^2}{2}$.

6°. *Límite de carga.* — Aun poniéndose en las condiciones más favorables, el potencial del conductor de la máquina tiene un límite que no puede traspasarse, sean cuales fueren la velocidad de rotación del platillo y lo que dure la operación. Este límite es más ó menos elevado para la misma máquina, por causa de la pérdida más ó menos abundante que se produce por el aire, por los soportes y por la recomposición de una parte de las dos electricidades de los conductores y de los cojines.

Ya se ha hablado de las dos primeras causas de pérdida; cuanto á la tercera, es una consecuencia del funcionamiento mismo de la máquina. En efecto, como el potencial en los conductores crece con la velocidad de rotación, llega un momento en que las chispas saltan entre los peines y los cojines. Entonces se ha alcanzado un *límite de carga* análogo al *límite práctico del vacío* en la máquina neumática. Para atenuar el efecto de estas descargas espontáneas, se aislan y se alejan los cojines que constituyen uno de los polos de la máquina tanto como es posible del conductor que constituye el otro polo. Á fin de llevar todo el potencial al conductor, se tiene cuidado de pegar á lo largo de los montantes de madera de la máquina las hojas de estaño O (fig. 770), que bajan desde los cojines hasta la cadena D.

Por fin, ésta debe penetrar en el agua de un pozo, comunicar con el pie de un árbol, ó bien, si es posible, con una de los cañerías de gas ó de agua del laboratorio donde se utiliza la máquina.

863. **Principio de las máquinas de influencia. — Historia.** — En las máquinas del género Ramsden, se debe la electricidad al frotamiento que á su vez se obtiene por el trabajo de un motor. De manera que aquí se produce una especie de transformación del trabajo en electricidad. Esta transformación se efectúa de modo más aparente en las máquinas eléctricas sin frotamiento, donde la influencia electrostática de una carga fija de electricidad sirve para electrizar, por decirlo así indefinidamente un platillo móvil. Las primeras máquinas de este género fueron construídas en 1865 por Holtz y, casi en la misma época, por Tœpler; pero ya á fines del siglo último ideó Volta un aparato fundado en el mismo principio: el *electróforo*, que puede considerarse como la más sencilla de las máquinas eléctricas que funcionan *por influencia*.

864. **Electróforo (de Volta).** — El aparato se compone sencillamente de una torta de resina B (fig. 772), vaciada en un molde de madera, ó mejor dicho en un molde metálico, y de un disco de

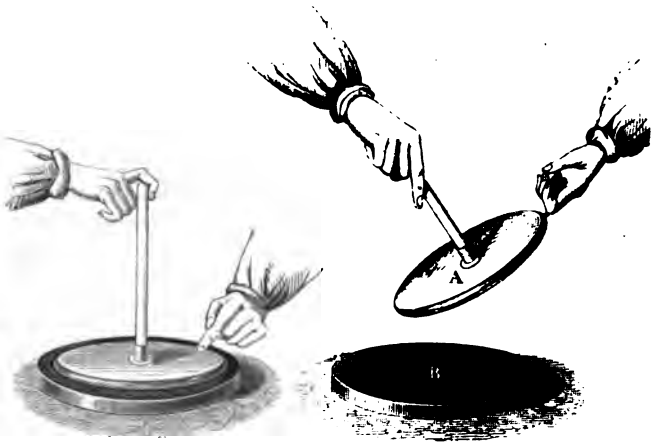


Fig. 771. Fig. 772.

madera A, cubierto de una hoja de estaño y provisto de un mango aislador de vidrio. Es conveniente que la resina esté mezclada con pez, y se necesita que la superficie de la torta sea lisa.

Empiézase por secar la resina y el disco calentándolos suavemente y después se bate la torta con una piel de gato, lo cual la electriza negativamente. Si entonces se coloca el disco de madera cubierto de estaño sobre la resina (fig. 771), ésta, que es muy mala conductora, conserva su electricidad negativa y, por su influencia sobre el disco,

atrae la positiva hacia la cara que está en contacto con ella, mientras rechaza á la otra cara la electricidad negativa. Tocando entonces la hoja de estaño con el dedo, lo que sustrae es la electricidad negativa, y el disco de madera queda electrizado positivamente. En efecto, si se le retira con una mano cogiéndolo por el mango de vidrio y si se le presenta la otra mano (fig. 772), sácase una viva chispa, debida á la recomposición de la electricidad positiva del disco con la negativa de la mano. Esta chispa basta para hacer detonar en el eudiómetro mezclas gaseosas y operar síntesis químicas.

Observaciones. — 1°. En realidad, los fenómenos de influencia que se producen en el electróforo son algo más complejos: también el molde interviene, pues para obtener un buen funcionamiento no sólo se necesita que el molde sea conductor, sino también que esté en contacto permanente con el suelo.

2°. En un aire seco, la torta de resina del electróforo puede conservar durante meses enteros la electricidad que se le comunica, dando en este tiempo tantas chispas como se quiera, sin azotar de nuevo á la resina con la piel de gato, con tal que se tenga cuidado de efectuar cada vez la maniobra precedente.

3°. En lo tocante á la cantidad de electricidad desarrollada, es ventajoso reemplazar la torta de resina por un disco de ebonita; pero esta sustancia presenta el inconveniente de perder casi completamente sus propiedades aisladoras por efecto de la oxidación del azufre que entra en su composición [1].

865. **Máquina dieléctrica de Carré.** — *Principio.* — La máquina llamada *dieléctrica* construida por M. Carré está combinada de tal modo que se carga por sí misma.

Compónese de dos platillos que giran en sentidos contrarios; el mayor, B, es de ebonita, y el menor, A, de vidrio (fig. 773). Cúbrense uno á otro los $\frac{2}{3}$ á los $\frac{3}{4}$ de sus radios; y el platillo A gira lentamente por medio de un manubrio M, mientras que el B recibe un movimiento de rotación rápido de una correa sin fin que va de una polea grande á una pequeña. Sirve de inductor el platillo A, que es *automático* y *continuo*, puesto que se electriza por sí mismo *positivamente*, girando entre los dos cojinetes F y F'. Actúa por inducción, á través del platillo B, sobre un peine *i*, y le sustrae la electricidad negativa, que va á depositarse sobre el platillo B; en consecuencia, el conductor *d*, fijo al peine, se electriza positivamente. Luego, como el platillo B gira rápidamente, su electricidad negativa va á inducir otro peine *g* y á sustraerle la electricidad positiva. El platillo B vuelve en consecuencia al estado neutro, mientras que un fuerte conductor C unido con el peine *g* se carga de electricidad negativa.

Entonces saltan chispas continuas entre la bola *e* y el conductor C, polos de la máquina. Con platillos cuyos diámetros respectivos son de 38 y de 49 centímetros, las chispas pueden alcanzar 15 centímetros. Son más frecuentes cuando se aumenta la capacidad de la máquina añadiendo un condensador auxiliar, como una botella de Leyden.

866. **Máquina eléctrica de Holtz.** — 1°. *Descripción.* — La máquina de Holtz se compone de dos platillos de vidrio delgado de diámetros desiguales, dispuestos paralelamente (fig. 774), y distantes algunos milímetros uno de otro. El mayor AA, que tiene 60 centímetros de

1. Se le devuelven lavando con potasa ó sosa.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF

diámetro, se mantiene fijo por medio de cuatro garruchas de madera *a*, sostenidas por ejes y pies de vidrio. Delante del platillo A está el segundo, BB, de 55 centímetros de diámetro únicamente; encuéntrase fijo á un eje horizontal de vidrio, que pasa libremente por una abertura central practicada en el platillo grande. El platillo B es entero en toda su extensión, mientras que el A está agujereado en las dos extremidades de un mismo diámetro, por dos *ventanas*, F, F'.

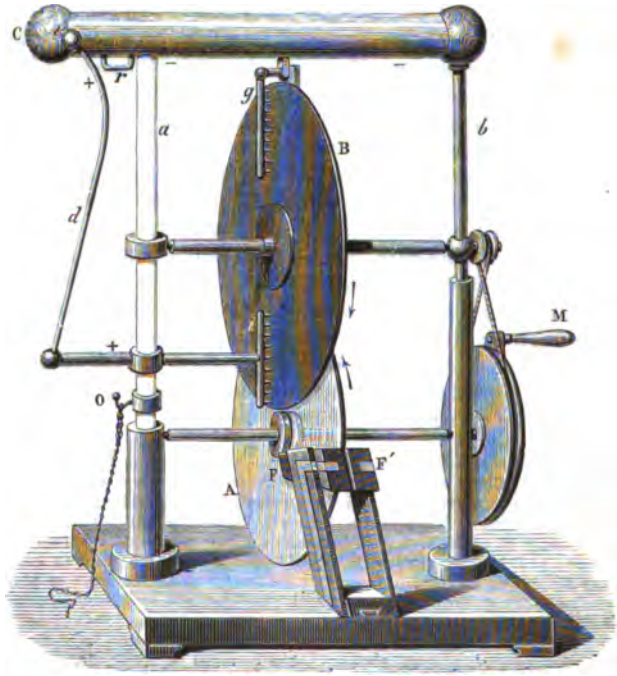


Fig. 773.

Á lo largo del borde inferior de la ventana F, en la cara posterior del platillo, está pegada una banda de papel *p* (fig. 776), y en la anterior una lengüeta *n* de cartón delgado, unida con la banda *p* por una fina banda de papel, que pasa por encima del borde de la ventana. En la ventana F', el borde superior está análogamente provisto de una banda de papel *p'* y de una lengüeta *n'*. Las bandas *p*, *p'* se llaman las *armaduras*. Los dos platillos, las armaduras, las lengüetas (sobre todo sus bordes) están cubiertos de una capa de barniz de goma laca.

Delante del platillo B, á la altura de las armaduras, se encuentran dos peines de cobre O, O' sostenidos por dos conductores del mismo

metal C, C′ (fig. 774). Éstos sostienen en sus extremidades anteriores dos bolas bastante gruesas, atravesadas por dos vástagos de cobre terminados en otras dos bolas más pequeñas, *r*, *r′*, y provistas de mangos de ebonita K, K′. Estos vástagos pueden, no sólo resbalar con frotamiento suave en las gruesas bolas, sino girar con ellas, de

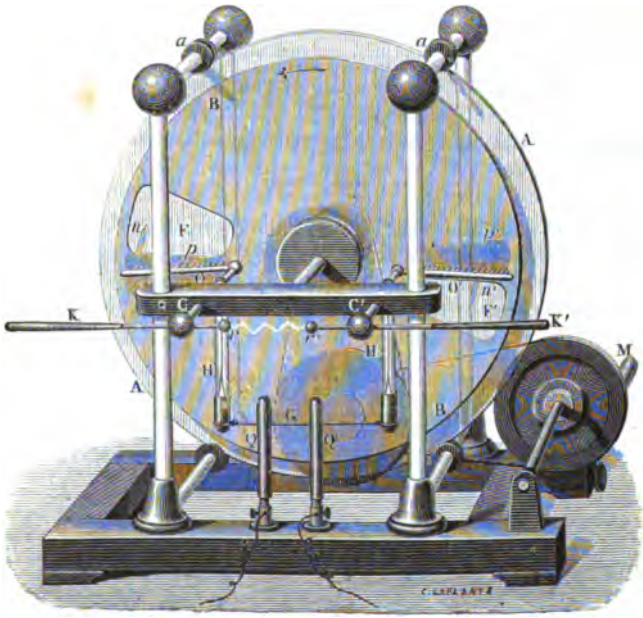


Fig. 774.

modo qne se aproximen ó se inclinen más ó menos. La rotación del platillo B se obtiene por medio de un manubrio M y de una serie de poleas y de correas sin fin; su velocidad es de 12 á 15 vueltas por segundo próximamente; debe efectuarse en el sentido de las flechas, es decir, hacia las puntas de las lengüetas *n*, *n′* (fig. 776).

2°. *Carga y funcionamiento.* — Hay que empezar por *cargar* las armaduras *p p′*, es decir, por electrizarlas, una positiva y otra negativamente. Tómase una placa de ebonita, que se electriza frotándola, sea con una piel de gato, sea con la mano; después se ponen en contacto las bolas *r*, *r′*, de modo que los dos conductores C, C′ (fig. 775) no formen más que uno. Acercando entonces hasta detrás de una de las armaduras, por ejemplo *p* (fig. 776), la placa de ebonita, que es negativa, se sustrae por la lengüeta *n* la electricidad positiva de la armadura, y se la carga de electricidad negativa. Esta carga induce á su vez, á través del platillo B, á medida que da

vueltas, los conductores OCC'O' (fig. 775), y sustrae por el peine O la electricidad positiva, que se deposita en la cara anterior del platillo móvil, mientras que al mismo tiempo la electricidad negativa, rechazada al peine O', va á depositarse como la primera en la parte anterior del platillo B. Después las dos electricidades son arrastra-

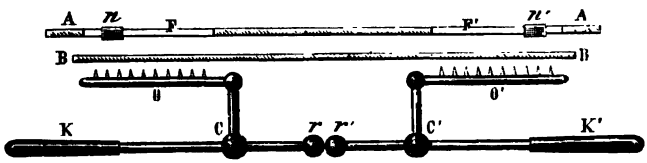


Fig. 775.

das por la rotación del platillo, y al cabo de media revolución, todo el contorno inferior, desde *p* á F' (fig. 776), queda electrizado positivamente, y su contorno superior, desde *p'* á F negativamente. Ahora bien, como las dos electricidades contrarias, por debajo y por encima pe la ventana F', actúan en el mismo sentido para descomponer la

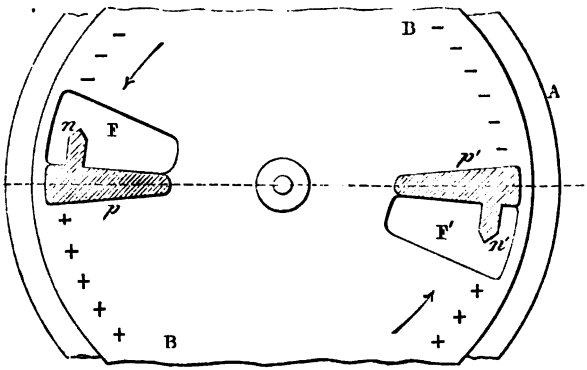


Fig. 776.

electricidad neutra de la armadura *p' n'*, la parte *p'* se electriza positivamente, mientras que la negativa se desprende por la lengüeta *n'* y va á depositarse en la cara interna del platillo B, donde, por causa del escaso grueso de éste, neutraliza casi completamente la electricidad positiva depositada en la cara anterior.

Entonces están cargadas las dos armaduras, cosa que se sabe al oir un ruido característico. El mismo efecto que en F' se produce en F, sobre la armadura *pn*, es decir que las electricidades contrarias, por encima y por debajo de *pn*, descomponen una nueva cantidad de electricidad neutra, y la carga negativa de la parte *p* aumenta, mientra que la electricidad positiva que se desprende por la lengüeta *n* va

á neutralizar la electricidad negativa que va de F' hacia F; y así sucesivamente hasta que la máquina alcanza un potencial máximo, con lo cual se establece el equilibrio entre todas sus partes. Á partir de este momento, la rotación se limita á mantener el potencial constante[1]. Una vez cargada la máquina y retirada la placa de ebonita, se apartan las bolas *r* y *r'*, hasta una distancia que depende de la máquina, pero que puede alcanzar fácilmente 15 á 20 centímetros: de una bola á otra salta continuamente un torrente de chispas (fig. 774) con tal que continúe el movimiento de rotación.

3°. *Constantes de la máquina.* — Dados platillos iguales, la máquina de Holtz es muy superior en rendimiento á la ordinaria de frotamiento.

También da rendimiento más considerable que las restantes máquinas de influencia. Esto depende de que la carga de los inductores, en vez de permanecer *constante* (como en la máquina Carré), va por el contrario *aumentando* cada vez más por el trabajo mismo del aparato, hasta alcanzar valores enormes: el *rendimiento* de la máquina crece entonces en la misma proporción[2]. En esto consiste la originalidad y la superioridad de las máquinas de Holtz.

4°. *Inversión de los polos. — Uso del conductor diametral.* — Si se separan demasiado las bolas *r* y *r'*, ó si se da vuelta al platillo en sentido contrario, la máquina se descarga. Á veces basta una sencilla variación de velocidad para ocasionar una *inversión* de los polos. Se ha tratado de evitar la inversión, sin lograrlo completamente, disponiendo un conductor diametral provisto de placas, que funciona como el conductor *rr'* de la máquina durante la carga.

5°. *Uso de los condensadores.* — Con frecuencia se cuelgan de los conductores C, C', dos *condensadores*, H, H' (fig. 774), que consisten en dos probetas de vidrio grueso, cuyas paredes interiores y exteriores están cubiertas por una hoja de estaño hasta la quinta parte de su altura. Cada probeta está cerrada por un tapón á través del cual pasa un vástago de cobre con garfio, que por un extremo comunica con la hoja de estaño interior, y suspendida por el otro de uno de los conductores. Exteriormente las dos hojas de estaño están en comunicación por medio de un conductor G. En realidad estas probetas no son más que pequeñas botellas de Leyden reunidas en cascada (855); una, H, se carga de electricidad negativa por dentro y positiva por fuera, la otra, H', de electricidad positiva en su parte interior y negativa en la externa. Como se cargan por medio de la máquina y se van descargando paulatinamente por las bolas *r* y *r'*, resulta que refuerzan la chispa.

867. **Máquina de Wimshurst.** — Esta máquina completamente nueva es también de influencia, y se distingue enteramente de la de Holtz por el hecho de ser *auto-excitadora*, quiere decir que se carga por sí misma.

1°. *Descripción.* — Compónese (fig. 777) de dos platillos de vidrio, barnizados con goma laca[3], cada uno de los cuales lleva un mismo

1. En un aire perfectamente seco la máquina puede funcionar mucho tiempo sin que sea necesario cargarla de nuevo con la placa de ebonita.

2. Pellat, *Conferencias sobre las máquinas eléctricas antiguas y recientes.* — (Asociación para el progreso de las ciencias).

3. Algunas veces se hacen de ebonita estos platillos, por ser una sustancia menos frágil que el vidrio; pero la ebonita tiene, no sólo el inconveniente ya señalado de perder sus propiedades aisladoras por la acción de la luz, sino también el de deformarse por el calor.

número par de sectores metálicos pegados cerca de la circunferencia[1]. Estos dos platillos reciben el movimiento de un mismo árbol accionado por un manubrio M, mediante poleas y correas una de las cuales únicamente es cruzada[2]; de manera que las rotaciones de los dos platillos se efectúan en sentido contrario. Frente á cada uno de ellos hay conductores diametrales C y C' ambos inclinados

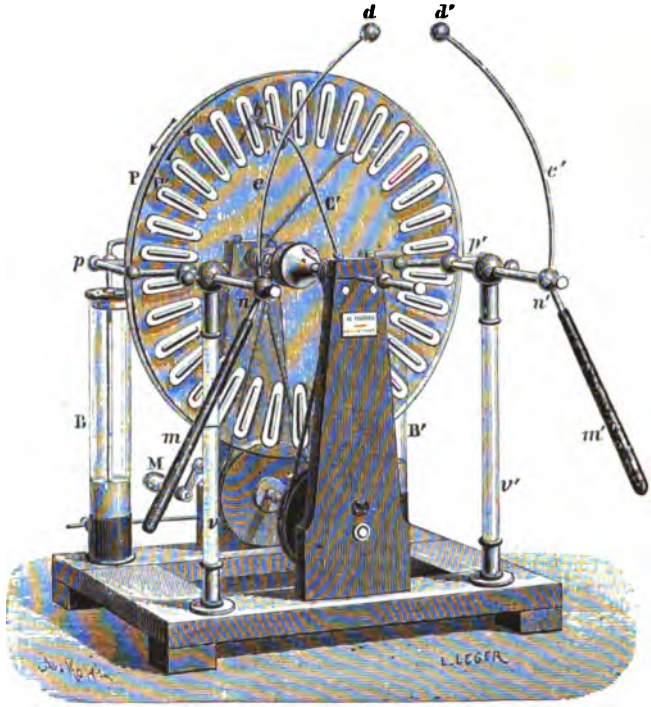


Fig. 777.

45° sobre el horizonte, pero en sentidos contrarios, de modo que resulten perpendiculares entre sí. Sus extremos están provistos de pequeños pinceles metálicos llamados *escobas* ó *cepillos*, que van á tocar por turno los sectores metálicos y á ponerlos de este modo en comunicación con la tierra por medio del eje y de la armadura de la máquina.

Estas piezas son suficientes para dar origen á la electricidad en esta máquina. En efecto, si se pone en movimiento un aparato así constituído, vense producirse las manifestaciones habituales en la oscu-

1. Este número importa poco; en el modelo de nuestro dibujo hay 34.
2. La representación de la correa de atrás como cruzada ha sido un error del dibujante

ridad : resplandores, penachos luminosos, descargas entre los platillos; además se oye el pequeño chisporroteo característico.

Ahora se trata de recoger la electricidad producida. Con tal fin se disponen á derecha é izquierda horizontalmente peines *p* y *p'* que abarcan los dos platillos en toda la longitud de los sectores metálicos ; estos peines comunican con dos arcos metálicos *e* y *e'* terminados por bolas de descarga *d* y *d'* que se pueden alejar más ó menos una de otra por medio de mangos de ebonita *m* y *m'* (fig. 777). Los peines no parecen desempeñar papel ninguno generador de la electricidad[1]; sólo sirven para *recoger* las electricidades separadas por el trabajo de la máquina. En *n* y *n'* se encuentran dos topes donde se pueden sujetar dos alambres para transmitir la electricidad.

2°. *Efectos de la máquina.* — Cuando se quiere aumentar la capacidad de los conductores, á fin de obtener chispas más frecuentes, se les pone en comunicación con los condensadores B y B' por medio de vástagos de cobre que es posible poner ó retirar á voluntad (fig. 778). Obtiénese una serie de chispas ruidosas, de 10 á 15 cm. de

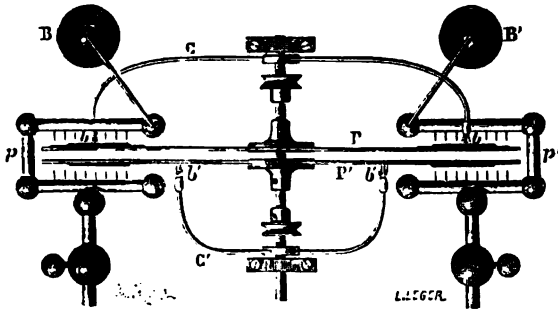


Fig. 778.

longitud, si los platillos giran con una velocidad de 250 á 300 vueltas por minuto, ó sean 75 á 80 del manubrio. Esta máquina tiene sobre todas las demás la inmensa ventaja de funcionar haga el tiempo que hiciere, aun en los más húmedos; es rarísimo que se niegue á cargarse.

Teoría. — Refirámonos al diagrama de la figura 779; los platillos P y P' están representados por secciones de cilindros; b_1 C b_2 y b'_1 C' b'_2 son los conductores diametrales, S y S' los sectores metálicos (se han representado únicamente seis en cada platillo para simplificar la figura); *p* y *p'* son los peines que comunican con los botones ó bolas de descarga *d* y *d'* por los arcos conductores *e* y *e'*. La experiencia prueba que no tenemos para qué ocuparnos de los peines en lo que se refiere al desarrollo de la electricidad.

Hemos dicho que esta máquina es auto-excitadora. Sin embargo, no se comprende que haya producción de electricidad si no se admite la existencia de una pequeña carga por pequeña que sea. Esto equivale á admitir que en la atmósfera

1. No pasa lo mismo en la máquina de Holtz.

no existen dos cuerpos que se encuentren en el mismo potencial, sobre todo si son aisladores ó están sostenidos por cuerpos que lo sean. Sábese en efecto que basta acercar á un electroscopio sensible un cuerpo aislador cualquiera para observar casi siempre rastros de electrización. Supondremos, pues, que la mitad ADB del platillo P' tenga escasa carga positiva y la otra mitad BEA escasa carga negativa.

La influencia de la carga positiva producirá por inducción en los sectores del platillo P, que van en sentidos opuestos, una carga negativa en la región más cercana, es decir, contra el vidrio; una carga igual positiva será rechazada simultáneamente en la superficie. Pero, á medida que los sectores pasan debajo de la escoba b_1, esta carga es enviada al suelo, y los sectores quedan electrizados

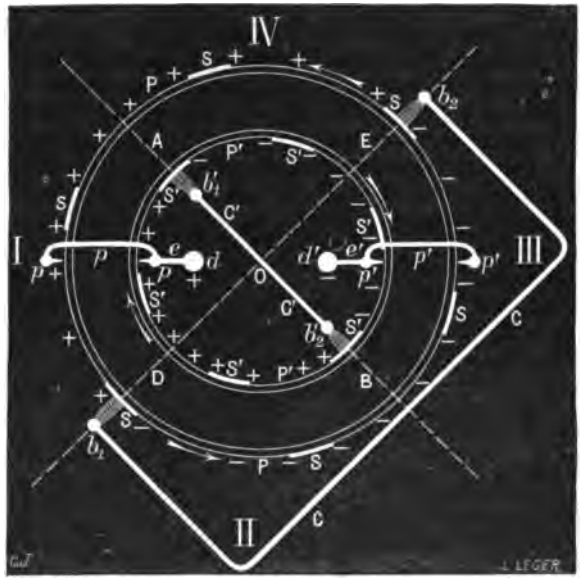


Fig. 779.

negativamente. La región BEA producirá el efecto inverso y, por la misma razón, los sectores de P quedarán electrizados positivamente después de su paso bajo la escoba b_2. Así pues, las dos mitades del platillo P' separadas por su conductor diametral, han inducido en las dos mitades del platillo P separadas por el conductor b_2 C b_1 cargas de electricidades contrarias.

Análogamente, las cargas positivas de la porción EAD del platillo P obrarán sobre los sectores del platillo P' que van en sentidos contrarios; por consiguiente, después de su paso debajo de la escoba b'_1, los sectores llevarán una nueva carga negativa, siendo rechazada al suelo por el conductor C' cantidad igual de electricidad positiva. Después de su paso por debajo de la escoba b'_2, adquirirán por el contrario una nueva carga positiva por razón de la influencia de las cargas negativas difundidas por la porción DBE del platillo P. Los dos platillos ejercerán acciones mutuas y aumentarán de esta manera sus cargas, hasta el límite fijo por la pérdida. En este momento, durante un instante cualquiera, las cargas adquiridas por la inducción mutua serán iguales á las cargas disipadas por las huídas.

El diagrama representa, según esta explicación, el estado eléctrico de los platillos. Cada uno de ellos está dividido por su conductor diametral en dos re-

giones, una positiva y negativa la otra. Si se consideran los cuatro cuadrantes I, II, III y IV, se ve que las cargas en II y IV son de signos contrarios y por consiguiente se atraen; en I y III son del mismo signo y por tanto se rechazan. De manera que los peines colectores podrán sustraerlas por sus puntas. La bola *d* se cargará positiva y *d'* negativamente.

OBSERVACIÓN. — Como los peines no desempeñan ningún papel en la producción de la electricidad de esta máquina, se ve que es indiferente acercar ó separar los arcos *e* y *e'* para poner en marcha. También se explica que sea imposible tener una inversión de corriente, aun en el caso de que se separaran las bolas de descarga más allá de la distancia explosiva.

868. **Observaciones sobre la teoría de las máquinas electrostáticas.** — Las teorías actuales de las máquinas electrostáticas son incompletas, en el sentido de que no explican todos los hechos observados. Estas máquinas han sido objeto de pequeño número de experimentos precisos. Son focos de electricidad de *alto potencial* y *pequeño rendimiento*.

El valor del potencial máximo depende de la forma de la máquina, del aislamiento de los conductores, y por fin de la potencia mecánica útil puesta en juego. Según Thomson, las buenas máquinas que dan chispas de 3 cm. de longitud, establecen entre sus polos una diferencia de potencial casi igual á la de una pila constituída por 50 000 á 80 000 elementos Daniell asociados en serie. Ciertas máquinas pueden pasar de ese potencial, pero se puede admitirlo como término medio para las que se emplean en cargar las baterías eléctricas.

Puede hacerse que la diferencia de potenciales exista sólo en un polo, con poner el otro en el suelo.

En todas las máquinas electrostáticas, la *electricidad positiva* sale de los peines en forma de *borlas violadas* (muy visibles en la oscuridad), *que van al encuentro del platillo giratorio*, es decir, que salen en sentido inverso del movimiento de rotación del platillo. La *electricidad negativa* se manifiesta de modo enteramente distinto en las puntas que le dan paso; toma el aspecto de pequeñas *estrellas* luminosas, también *violadas*.

El conductor que comunica con los peines *positivos* es el *polo negativo* de la máquina; el que comunica con los peines *negativos* es el *polo positivo*.

CAPÍTULO VIII

EFECTOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y DE LOS CONDENSADORES. EXPERIENCIAS CLÁSICAS.

EFECTOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

869. **Chispa eléctrica.** — *Producción.* — Uno de los primeros fenómenos que se observan cuando se experimenta con una máquina eléctrica es la viva chispa

que salta de los conductores cuando se acerca la mano. Ya se ha visto que la causa de este fenómeno es la acción por influencia que ejerce la electricidad po-

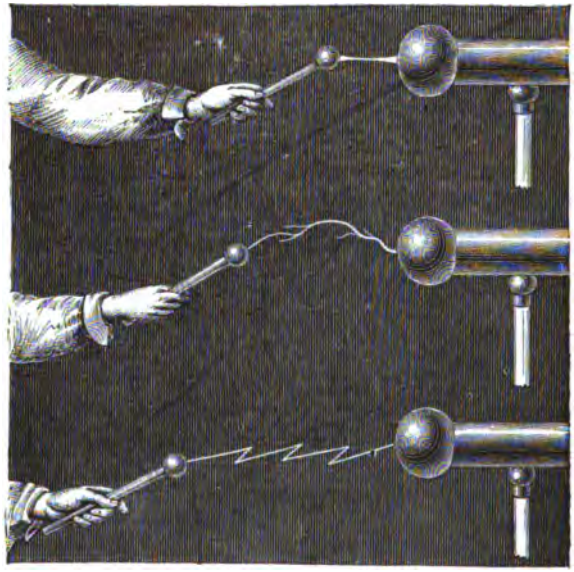


Fig. 780, 781 y 782.

sitiva de la máquina sobre la neutra de la mano. Esta electricidad se descompone y la atracción entre las electricidades contrarias de la máquina y de la mano acaba por dominar sobre la resistencia del aire; en este momento las dos electricidades se recomponen con ruido y luz, saltando la chispa, viva, instantánea y acompañada de picadura más ó menos fuerte según la potencia de la máquina.

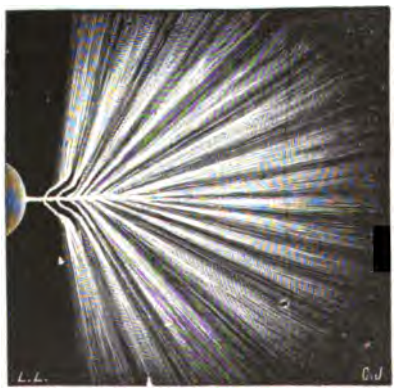


Fig. 783.

Forma.—La forma de la chispa es variable. Si salta á escasa distancia, es rectilínea (fig. 780). Más allá de 6 á 7 centímetros de longitud, se hace irregular y presenta la forma de una curva sinuosa, acompañada de ramificaciones muy finas (fig. 781). Por fin, si la descarga es muy fuerte, la chispa aparece en forma de zigzag (fig. 782). (Estos dos últimos son los aspectos de los *relámpagos*). También puede afectar la forma de *penacho* (fig. 783). Hemos visto (516) que la fotografía instantánea ha permitido fijar la forma real de las chispas y de los relámpagos fig. 527 y 528).

Duración. — Wheatstone en Inglaterra logró hacer apreciable la duración de

la chispa eléctrica por el método del espejo giratorio, aplicado por Foucault á la medida de la velocidad de la luz.

Más adelante pudo Arago hacer sensible la duración de los relámpagos, mediante un disco metálico giratorio en torno de un eje perpendicular á su plano, dividido en el sentido de los radios y á intervalos iguales, por aberturas longitudinales muy estrechas. Mirando los relámpagos á través de este disco, que giraba con velocidad conocida, se distinguían líneas tanto más anchas cuanto más duraba el relámpago.

Por fin, Lucas y Cazin imaginaron un instrumento, el *cronoscopio de chispas eléctricas*, que permite medir la duración de la chispa en millonésimos de segundo. Experimentaban poniendo una distancia de 5 milímetros entre dos bolas, cargadas por las armaduras de una batería eléctrica.

Así hallaron que la duración de la chispa crece con el número de las jarras (de 0,000026 sec. por 2 jarras á 0,000055 sec. por 8), que aumenta también con la distancia entre los dos polos; pero que es independiente del diámetro de las bolas entre que salta la chispa.

En las máquinas eléctricas es tan pequeña la duración de la chispa que ni siquiera con el cronoscopio se la puede valorar.

Distancia explosiva. — Llámase así á la *distancia máxima* á que se puede producir la chispa entre dos conductores electrizados. La distancia explosiva entre dos conductores electrizados es sensiblemente *proporcional á la diferencia de potenciales* de estos dos conductores. También depende del radio de las bolas entre las cuales se hace saltar la chispa.

870. **Experiencias del taburete eléctrico.** — La chispa eléctrica presenta notable aspecto cuando sale del cuerpo humano[1]. Aíslase la persona sobre un taburete de pies de vidrio, llamado *taburete eléctrico;* después se le hace poner una mano sobre uno de los conductores de la máquina. Como el cuerpo humano conduce bien la electricidad, á medida que la máquina se carga, el fluido se difunde por el cuerpo de la persona al mismo tiempo que por los conductores, de modo que si se tocan sus manos, su cara ó sus ropas, saltan chispas parecidas á las de la misma máquina. Mientras no se acerca la mano á la persona aislada, ésta no siente ninguna conmoción, á pesar de que está muy electrizada; pero sus cabellos se erizan y se dirigen hacia los cuerpos que les presentan, sintiendo en las manos y el rostro ligero soplo, que es efecto de la repulsión del aire, á medida que se electriza por contacto.

También se puede electrizar á una persona, que esté aislada en el taburete de pies de vidrio azotándola con una piel de gato; entonces su

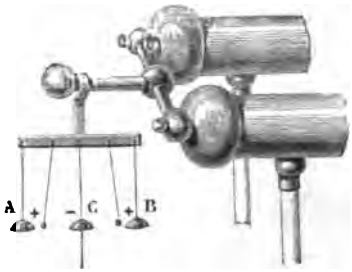


Fig. 784.

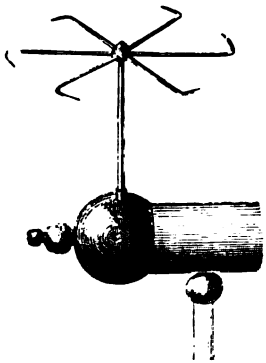


Fig. 785.

cuerpo atrae el péndulo eléctrico y produce chispas al acercar á ella la mano. Si la persona que tiene en la mano la piel de gato sube á su vez sobre un taburete aislador, ambos observadores se electrizan, uno positiva y otro negativamente.

871. **Campanario eléctrico.** — El *campanario eléctrico* es un pequeño aparato com-

1. El físico francés Dufay fué quien primero sacó una chispa del cuerpo humano, en 1734.

puesto de tres timores metálicos suspendidos de una varilla horizontal, que se pone en comunicación con la máquina eléctrica (fig. 784). Los timbres A y B cuelgan de cadenas metálicas que establecen la comunicación con la varilla, mientras que el del centro C está suspendido con un hilo de seda que lo aisla de

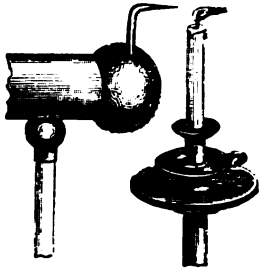


Fig. 786.

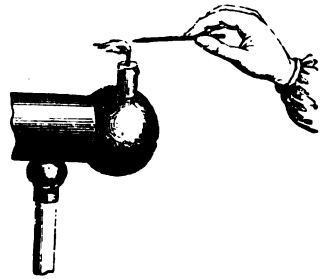


Fig. 787.

la máquina. Por fin entre el timbre ó campanilla central y los otros se ven dos pequeñas bolas de cobre suspendidas por hilos de seda. Cuando se carga la máquina, los timbres A y B se electrizan positivamente y atraen las bolas, rechazándolas en seguida apenas hay contacto. Pero como éstas se encuentran entonces cargadas de electricidad positiva, se dirigen hacia la campanilla C, que á pesar de hallarse en comunicación con el suelo está cargada de electricidad negativa por influencia de las otras dos. De manera que apenas se establece el contacto, las bolas son rechazadas hacia los timbres A y B, y ejecutan un movimiento de vaivén rápido y choques sucesivos que hacen sonar los tres timbres mientras está cargada la máquina.

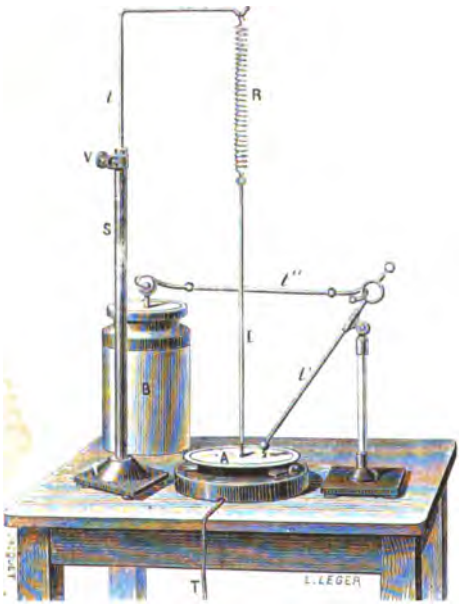


Fig 788.

872. **Molinete eléctrico; viento eléctrico.** — Llámase *molinete eléctrico* á un pequeño aparato que pone de manifiesto el *poder de las puntas*. Compónese de cinco ó seis brazos metálicos encorvados todos en el mismo sentido, terminados en punta y fijos en un centro común, móvil sobre un eje (fig. 785). Colocando este aparato en la máquina eléctrica, brazos y vástago central empiezan á girar apenas ella se carga, en dirección opuesta á las puntas. Este movimiento se debe á la repulsión que se ejerce entre la electricidad que sale por las puntas y la del mismo nombre que comunican al aire. En efecto molinete no se pone en movimiento en el vacío, y si se acerca la mano mientras

da vueltas en el aire, se siente un ligero soplo, que se debe al movimiento del aire electrizado y que recibe el nombre de *viento eléctrico*.

Este viento eléctrico no es sólo sensible á la mano, sino que puede soplar y aun apagar la llama de una bujía, por lo menos cuando procede de una máquina eléctrica potente (fig. 786).

Obtiénese el mismo efecto poniendo la bujía en uno de los conductores y presentándole una punta metálica que se mantiene en la mano (fig. 787). En este último caso la corriente procede de la electricidad contraria que se desprende de la punta metálica por la influencia de la máquina.

873. **Reversibilidad de las máquinas eléctricas.** — Es posible (fig. 788) transformar en trabajo mecánico la energía eléctrica almacenada en una botella de Leyden B; opérase del modo que sigue [1]:

1°. La armadura interior de la botella B está electrizada positivamente y en comunicación con un disco de aluminio A por medio de los vástagos metálicos *l''*, *l'*. Una torta de resina, electrizada negativamente, y colocada paralelamente debajo del disco, lleva en su centro un botón de cobre que comunica con la tierra T. Entre el disco A y la torta hay evidentemente atracción. Este, que se encuentra suspendido por un vástago aislador I de un muelle apropiado R, fijo en el vástago *l*, baja por influencia de esta atracción. Primero en el potencial B, muévese *con carga constante* hasta el momento en que llega á tocar el botón de la torta, y en este momento toma el potencial cero; después de lo cual es llevado, con carga constante, hasta ponerse en contacto con *l'* por la reacción del muelle R. Entonces el órgano móvil ha efectuado un período de oscilación, que repite mientras hay en B carga suficiente.

Este movimiento de vaivén del disco puede ser transformado fácilmente en un movimiento de rotación. Claro está que el aparato es *reversible*, pues moviendo el electróforo con la mano, se puede cargar una botella de Leyden.

2°. Puede probarse directamente la reversibilidad por medio de máquinas de influencia: uniendo sus polos y haciendo funcionar una de ellas como *generadora de energía eléctrica*, la otra se pone entonces á girar, y puede realizar un trabajo; entonces funciona como *motor*. La experiencia es fácil de realizar con dos máquinas Wimshurst. También es posible utilizar máquinas de influencia cualesquiera; pero las de frotamiento no se prestan evidentemente á este experimento

EFECTOS DE LOS CONDENSADORES.

874. **Efectos diversos de las descargas eléctricas.** — Con los condensadores y sobre todo con las botellas de Leyden y las baterías es como mejor se manifiestan los efectos de la electricidad estática. Son muy variados, pudiendo dividírseles, según la naturaleza de los fenómenos que producen, en *fisiológicos*, *luminosos*, *caloríficos*, *mecánicos* y *químicos*. También se pueden clasificar las descargas en disruptivas y conductivas. En las primeras se utiliza la energía eléctrica especialmente en la chispa. En las segundas, la mayor parte de la energía puesta en libertad es recibida por los conductores á través de los cuales se efectúan las descargas.

875. **Efectos fisiológicos.** — Los *efectos fisiológicos* son los que la electricidad produce en los seres vivos, ó bien en los animales recién muertos. Consisten en los primeros en una excitación violenta de la sensibilidad y de la contractilidad de los tejidos orgánicos que la descarga atraviesa, y en los últimos en contracciones musculares bruscas que asemejan el regreso á la vida. Por el momento no hablaremos sino de las acciones fisiológicas ejercidas por la electricidad á alto potencial.

La conmoción que produce la chispa eléctrica adquiere gran intensidad y carácter particular cuando se la saca de la botella de Leyden, tocando con una mano su armadura exterior y con la otra la inferior. La conmoción se deja sentir hasta en el codo con una botella pequeña; si ésta es de mayor capacidad, llega hasta el hombro y aún hasta el pecho.

Esta conmoción de la botella de Leyden puede manifestarse simultáneamente en gran número de personas. Con tal fin se reunen *formando cadena*, esto es,

1. Experiencias tomadas del curso de M. G. Lippmann.

dándose las manos de manera continua; después, cuando la primera toca la armadura exterior de una botella cargada, y la última al mismo tiempo la bola de la armadura interior, todas reciben simultáneamente la conmoción, que se gradúa á voluntad cargando más ó menos la botella. En esta experiencia, la pérdida á través del suelo hace que las personas que se encuentran en el centro de la cadena sientan conmoción más ligera que las de las extremidades inmediatas á la botella.

Con las grandes botellas de Leyden y las baterías, la conmoción puede ser causa de graves daños.

876. **Efectos luminosos en los gases enrarecidos : Resplandores y descargas en el huevo eléctrico.** — La recomposición de las dos electricidades de fuerte tensión se efectúa siempre con desprendimiento de luz y produce *chispas*, *penachos* ó *resplandores* que se sacan de las máquinas eléctricas, de la botella de Leyden y de las baterías. El resplandor de la luz es tanto más vivo cuanto mejores conductores son los cuerpos entre que se verifica la explosión, y su color varía, no sólo con la naturaleza de estos cuerpos, sino también con la de la atmósfera ambiente y de la presión.

Estúdianse los efectos de la presión exterior en la oscuridad por medio del *huevo eléctrico*. Llámase así á un globo de vidrio sostenido por un pie de cobre, en el cual hay dos vástagos de latón terminados en bola (fig. 789). El vástago inferior resbala frotando en una vaina de cuero, de modo que se puede acercarlo ó alejarlo á voluntad. Una vez hecho el vacío en el globo con aproximación de 1 á 2 milímetros, se pone el vástago superior en comunicación con un foco eléctrico de alto potencial, y el pie con el suelo : obsérvase de una bola á otra un resplandor purpurino poco intenso y continuo; el brillo aumenta hacia las extremidades, sobre todo en el lado de la bola positiva; la negativa, así como el vástago que la sostiene, aparecen envueltos en luz violada.

Si se deja penetrar poco á poco el aire, la luz vuelve á hacerse blanca y brillante, y acaba por reducirse á la forma de chispa.

El resplandor que parece salir del polo positivo es rosado en el aire enrarecido, blanco si el globo contiene ácido carbónico y azul violado con el hidrógeno.

En un gas más enrarecido aparecen las descargas que se llaman *estratificadas* formadas por bandas alternativamente brillantes y oscuras.

877. **Efectos luminosos en el vacío : fenómenos de Crookes.** —

Fig. 789.

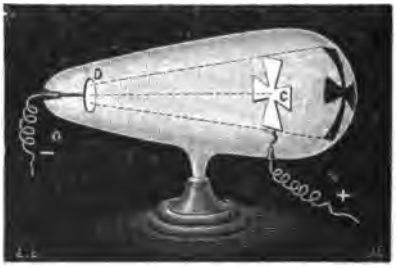


Fig. 790.

En un vacío más perfecto se observan fenómenos nuevos : los resplandores desaparecen y la fluorescencia del vidrio, exaltada por la pared opuesta al eléctrodo negativo, es lo único que indica el paso de la electricidad.

Todo ocurre como si las moléculas restantes estuvieran electrizadas y fueran lanzadas después en dirección normal al eléctrodo negativo. Deteniendo por medio de una cruz de aluminio las moléculas *disparadas* (fig. 790), la fluorescencia es destruída en el vidrio en las direcciones que encuentran el obstáculo, y apa-

rece sobre el vidrio una sombra de la cruz. Puede utilizarse la energía del *bombardeo* para poner en movimiento un pequeño molinete sostenido por dos traviesas de vidrio, para producir magníficos efectos de fluorescencia, etc.

878. **Efectos luminosos ordinarios : Botella, tubo y cuadro fulminantes.** — Los efectos luminosos en el aire á la presión ordinaria se ponen de manifiesto por medio de diversos aparatitos : la *botella* y el *tubo fulminantes*, *el cuadro mágico*, etc.

La *botella fulminante* es una botella de Leyden cuya armadura exterior está formada por una capa de barniz sobre que se ha extendido limadura de cobre. Una banda de estaño, pegada en el borde inferior de la botella, se encuentra en comunicación con el suelo por medio de una cadena de metal (fig. 791) ; otra segunda banda, situada más arriba, sostiene un apéndice que llega hasta unos dos centímetros próximamente del garfio que es muy encorvado. Suspendiendo esta botella de una máquina eléctrica en acción, la descarga se opera espontáneamente entre su garfio y su armadura, saltando por la limadura largas y brillantes chispas.

Fig. 791.

El *tubo fulminante* está formado por un tubo de vidrio de un metro de longitud próximamente, dentro del cual se pega, siguiendo línea helicoidal, una serie de pequeñas hojas de estaño en forma de rombo, de modo que entre ellas sólo queden soluciones de continuidad muy pequeñas. En las extremidades hay dos armaduras de cobre con garfio, que comunican con las dos extremidades de la hélice. Si manteniendo el tubo por un extremo se presenta el otro á una máquina eléctrica (fig. 792), saltan simultáneamente chispas á cada solución de continuidad, produciendo un rastro luminoso muy brillante, sobre todo en la oscuridad.

El *cuadro fulminante* ó *mágico* es un cuadro de vidrio ordinario en que se pega una banda de estaño muy delgada, que se dobla gran número de veces paralelamente á sí misma, según indica la línea negra en la figura 793. En esa banda se hacen con un instrumento cortante soluciones de continuidad muy pequeñas, dispuestas de modo que representen un objeto determinado, por ejemplo un

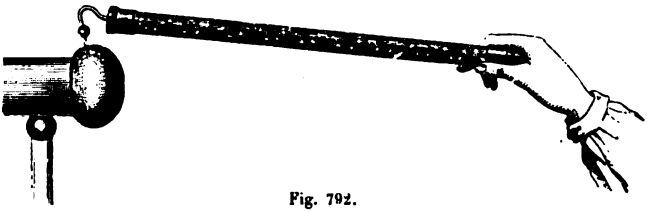


Fig. 792.

pórtico, una flor, etc. Fijo el cuadro entre dos columnas de vidrio, se pone la extremidad superior de la banda de estaño casi en contacto con una máquina eléctrica, y la otra con el suelo. Desde que la máquina funciona, salta la chispa á cada solución de continuidad, y reproduce en líneas de fuego el objeto que se ha representado en el vidrio.

879. **Efectos caloríficos : Incandescencia é inflamación ; Fusión y volatilización.** — **Retratos eléctricos.** — La chispa eléctrica es también un foco de calor muy intenso.

Al atravesar los líquidos combustibles, como el alcohol y el éter, los inflama. La descarga de una botella de Leyden ordinaria basta para inflamar éter colocado en un pequeño vaso de vidrio cuyo fondo está atravesado por un vástago de cobre de bola, fijo en un pie del mismo metal (fig. 794). Para que salga bien la misma experiencia con el alcohol, precisa calentar de antemano un poco el líquido.

Cuando se hace pasar la descarga de una batería por un alambre de hierro, se pone rojo blanco,

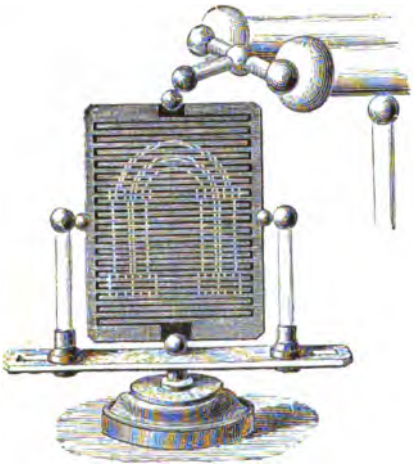


Fig. 793.

Fig. 794.

se funde y arde con luz deslumbradora. Los alambres de platino, de oro y de plata se funden y se volatilizan.

Retrato de Franklin. — Si se somete á la descarga de una batería una hoja de oro, aislada entre dos láminas de vidrio ó dos cintas de seda, el oro se volatiliza y queda como residuo un polvo violado, que es sencillamente oro muy dividido. Así es como se obtienen los *retratos eléctricos*.

Recórtase según se ve en *abm* (fig. 795) una hoja de cartón delgado dibujando en ella el retrato que se desea reproducir por medio de líneas caladas; después se pegan en sus extremos dos bandas de estaño *a* y *b*. Sobre la cortadura se

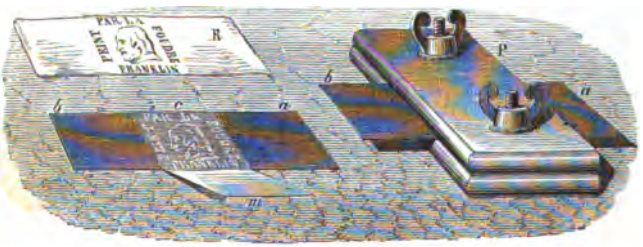


Fig. 795.

pone una de esas hojas de oro extremadamente finas que preparan los laminadores, teniendo cuidado de que llegue hasta encima de las láminas de estaño; bájase la parte *m* del cartón sobre la hoja de oro, y se coloca todo sobre una tela de seda blanca en una prensa de madera P. Entonces basta con hacer pasar de *a* hacia *b* la descarga de una batería de escasa potencia para que el oro

volatilizado vaya á formar en la seda, á través del calado, un depósito oscuro que reproduce el dibujo (casi siempre el retrato de Franklin).

880. **Efectos caloríficos : Termómetros de Riess.** — Riess ha puesto también de manifiesto el calor desprendido en una descarga *conductiva*. Esta se efectuaba á

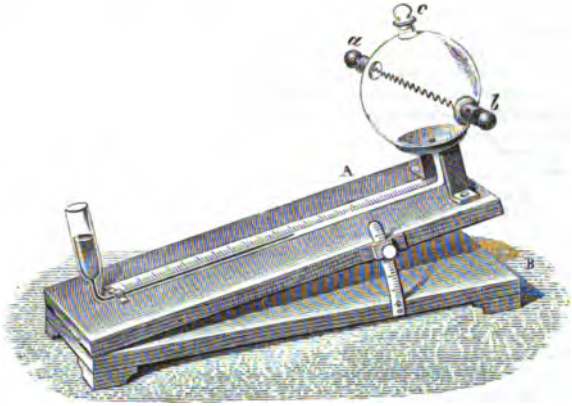


Fig. 796.

través de una espiral formada por un alambre de platino muy fino *ab* dispuesto dentro de un matraz (fig. 796). El gollete de éste, encorvado en forma de vástago termométrico, contiene un líquido que en el momento de la descarga es expulsado por la brusca expansión del aire caliente. Puede calcularse el movimiento por medio de una graduación adaptada á una tabla A, que se puede inclinar más ó menos á fin de aumentar ó disminuir la sensibilidad de la medida.

881. **Efectos mecánicos.** — Del paso de una fuerte descarga eléctrica á través de cuerpos poco conductores resultan desgarramientos, rupturas y expansiones violentas. El vidrio es taladrado; la madera y las piedras rotas; los gases y los líquidos se agitan violentamente. Estos *efectos mecánicos* de la chispa eléctrica se ponen de manifiesto en las clases por medio de diversos aparatos : citaremos el *taladra-vidrio* y el *taladra-tarjetas*.

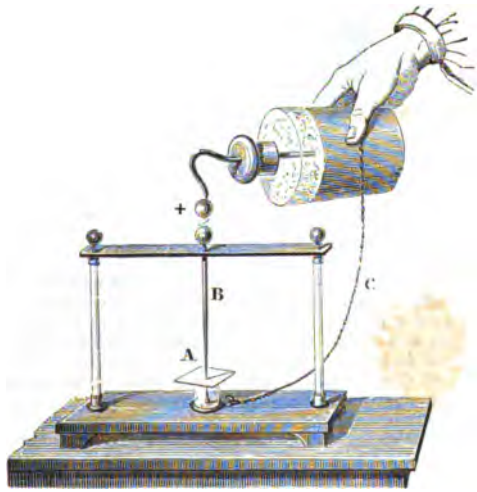


Fig. 797.

Experiencia del taladra-vidrio. — Este aparato se compone de dos columnas de vidrio que sostienen, mediante un travesaño horizontal, un conductor B terminado en punta (fig. 797). La lámina de vidrio A, que se trata de taladrar, des-

cansa encima de un cilindro de vidrio, donde hay otro conductor, terminado en punta también. Puesto éste en comunicación por medio de un alambre metálico con la armadura exterior de una fuerte botella de Leyden ,se acerca el garfio de la botella á la bola que termina el conductor B. La chispa salta entonces entre los dos conductores y el vidrio queda taladrado.

Si la lámina de vidrio fuera gruesa, no se podría agujerearla sino con la descarga de una batería.

Experiencia del taladra-tarjeta. — El mismo aparato sirve también de taladra-tarjetas: basta con poner una lámina de cartón en vez de la de vidrio usada antes.

882. **Efectos químicos.** — Los efectos químicos de la electricidad consisten en combinaciones y descomposiciones que se producen al paso de la chispa eléctrica en los cuerpos que atraviesa. Estos efectos parecen deberse á la elevada temperatura que origina el paso de la electricidad.

Gran número de gases son descompuestos por la acción prolongada de la chispa eléctrica. El hidrógeno carbonado, el ácido sulfhídrico, el amoniaco lo son por completo ; el ácido carbónico sólo de manera incompleta, dividiéndose en oxígeno y en óxido de carbono. La chispa estática llega á descomponer los óxidos, el agua y las sales ; pero dista mucho de producir efectos químicos tan enérgicos y variados como las corrientes eléctricas de las pilas y de las máquinas de inducción.

Experiencia de la pistola de Volta. — Llámase *pistola de Volta* á un pequeño aparato que sirve para probar las combinaciones por medio de la chispa eléctrica. Compónese de un pequeño vaso de latón (fig. 698), donde se introduce una mezcla detonante formada por 2 volúmenes de hidrógeno y 1 de oxígeno; después se le cierra herméticamente con un tapón de corcho. La pared lateral tiene adaptado un conducto por donde pasa un vástago metálico terminado en dos pequeñas bolas A y B y sujeto con mástic en un tubo de vidrio que lo aisla del resto del aparato. Cógese éste con la mano y se le acerca á una máquina eléc-

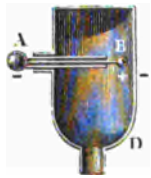


Fig. 798.

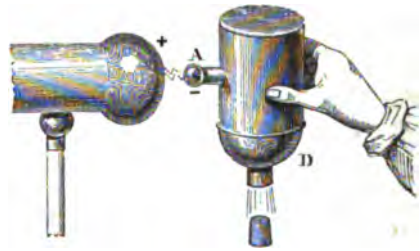


Fig. 799.

trica (fig. 799). Como entonces el botón A se electriza negativamente por influencia, y el B positivamente, la chispa salta entre A y la máquina, y en el mismo instante se produce otra entre B y la pared del vaso, que comunica con el suelo por medio de la mano. Esta última chispa es la que determina la combinación de los dos gases. Como este fenómeno viene acompañado de vivo desprendimiento de calor, el vapor de agua que se origina adquiere fuerza expansiva tal, que el tapón es lanzado con ruido análogo al de un tiro de pistola : de ahí el nombre del aparato.

Observación. — El empleo de los condensadores da origen á multitud de otros *efectos* importantes que los experimentos de Helmholtz, de Herz, Lodge, Tesla y otros físicos han puesto en evidencia, pero que no hay manera de separar de los fenómenos de inducción. Así es que los expondremos al hablar de éstos.

CAPÍTULO IX

ELECTROSCOPIOS Y ELECTRÓMETROS.

883. **Definiciones.** — Hemos definido ya los *electroscopios* (798), sirviéndonos de algunos, como el péndulo eléctrico de una ó dos bolas, y el electroscopio de hojas de oro (fig. 750). Cuanto á los *electrómetros*, son aparatos que sirven para *medir las diferencias de potenciales*. Distínguense los *electrómetros absolutos*, que permiten calcular los potenciales inmediatamente en *unidades absolutas* (balanza de Coulomb, electrómetro esférico de Lippmann, electrómetro absoluto de Thomson), y los *electrómetros relativos*, á que sólo se exige que sean sensibles.

El más cómodo y clásico de los electroscopios es el *de hojas de oro*, que vamos á describir con pormenores.

884. **Electroscopio de hojas de oro.** — Este aparato consiste esencialmente en un vástago de latón vertical, terminado en lo alto por una bola *b* del mismo metal, y abajo por dos hojas de oro batido *f*, *f*, muy ligeras[1]. Este vástago pasa frotando por el tapón P (que conviene hacer de parafina) de una campana de vidrio (fig. 750), colocada sobre un platillo cualquiera; esta campana sirve al mismo tiempo de sostén y de envoltura protectora para el instrumento. Cúbrese el tapón con una tapadera A, á fin de evitar que se deposite el polvo cuando no funciona el aparato. La figura 800 representa un modelo más antiguo de electroscopio de hojas de oro.

Fig. 800.

Operación y teoría. — Cuando se acerca lentamente al botón un cuerpo cargado de electricidad cualquiera, negativa por ejemplo, esta electricidad descompone por influencia el fluido neutro del conductor, y entonces la positiva es atraída hacia la bola, mientras que la negativa es rechazada hacia las hojas de oro *n*, *n*. Encontrándose entonces éstas cargadas de la misma electricidad, se rechazan mutuamente y su divergencia prueba que el cuerpo A está electrizado (fig. 800).

1. En vez de hojas de oro pueden tomarse dos pajas muy delgadas : entonces se le llama *electroscopio de pajas*.

Para reconocer la naturaleza de su electricidad, se empieza por cargar el electroscopio con el cuerpo mismo. Con tal fin, mientras se encuentra el instrumento bajo la influencia del cuerpo A, se toca con el dedo el botón C: entonces la electricidad del mismo nombre es rechazada hacia el suelo y la bola queda cargada de electricidad *contraria* á la del cuerpo. Las hojas de oro empiezan por caer, porque toda la electricidad se encuentra en C; pero si se retira el dedo y después el cuerpo A, divergen de nuevo. Falta por ver cuál es la especie de electricidad que conserva el aparato.

Acércase á la bola desde lejos y *lentamente* una barra de vidrio cargada positivamente. Si la divergencia de las hojas aumenta es porque la electricidad de la barra en rechazada á la parte inferior, de donde se deduce que es de la misma especie que la del vidrio, quiere decir, positiva. Si la divergencia disminuye, es porque la electricidad del aparato es atraída por la del vidrio: es pues de nombre contrario, quiere decir negativa.

Observaciones. — 1°. También se llega á reconocer la especie de electricidad que posee un cuerpo cargando primero el electroscopio con una electricidad conocida. Si después las hojas de oro divergen cuando se acerca el cuerpo, su electricidad es del mismo nombre que la del electroscopio.

2°. Es inútil secar el aire debajo de la campana colocando en ella una cápsula que contenga cal viva ó cualquier otra materia ávida de agua, si se usa un tapón de parafina. Ya se ha visto que hasta se puede introducir debajo de la campana un platillo lleno de agua sin aumentar la pérdida.

885. **Electrómetro de Henley.** — Éste es una especie de péndulo eléctrico destinado á indicar los progresos de la carga de un conductor y en particular de las baterías eléctricas. Compónese de un vástago de madera *d* al cual se adapta un cuadrante de marfil *c* (fig. 801). En el centro de este último hay un eje alrededor del cual gira una aguja de ballena, terminada en una bola de médula de saúco *a*. El instrumento se atornilla de ordinario en uno de los conductores de una *máquina eléctrica*. Á medida que ésta se carga, la aguja diverge y sube hasta que se alcanza el máximum de tensión. Por lo demás, no hay relación sencilla entre la inclinación del péndulo y el valor del potencial. Por esto resulta impropio llamar *electrómetro* al aparato: en realidad es sólo un electroscopio de seguridad.

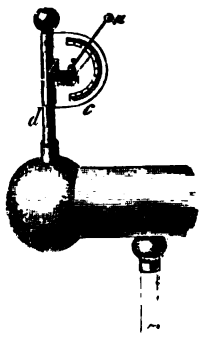


Fig. 801.

886. **Balanza de Coulomb.** — El primer electrómetro preciso fué la balanza de Coulomb. Para medir con este aparato el potencial V de un conductor electrizado, se pone en comunicación por medio de un

alambre largo y fino la bola fija *m* de la balanza (fig. 730) con un punto cualquiera del cuerpo : el potencial de la bola fija, medido por su carga, es igual al del cuerpo estudiado. Sábese en efecto que si *q* es la carga común comunicada á la bola móvil *n* (la que se encuentra en la extremidad de la aguja *pn*) y á la bola fija, si *f* es la repulsión, medida por el ángulo de torsión, y *d* la distancia de los centros, se tiene

$$f = \frac{q^2}{d^2}, \quad \text{de donde se deduce} \quad q = d\sqrt{f}.$$

Por fin, si *r* es el radio de la bola, se tiene

$$V = \frac{q}{r} = \frac{d}{r}\sqrt{f}.$$

887. **Unidades de potencial; unidad absoluta y unidad práctica** (*volt*). — La fórmula precedente expresa V en función de la masa eléctrica *q* ó de la fuerza eléctrica *f* y de las longitudes *d* y *r* : esto prueba que se pueden calcular los potenciales (como las masas eléctricas) con las mismas unidades que las demás magnitudes físicas.

La unidad de potencial, referida á las unidades C. G. S., se llama *unidad absoluta* de potencial. Como esta unidad es demasiado pequeña para aplicaciones prácticas, se ha elegido una *unidad secundaria* que vale *cien millones* de unidades absolutas y que se llama el *volt*[1]. De modo que se calcularán y contarán sea los potenciales, sea las diferencias de potencial en *volts*, como las cantidades de electricidad en *coulombs* y las capacidades eléctricas en *farads*.

888. **Electrómetro esférico absoluto de Lippmann.** — *Principio.* — Tiénese una esfera hueca T (fig. 802), cortada en dos partes por un plano diametral. El hemisferio inferior está sostenido por un pie aislador, mientras que el superior, que comunica con el primero, cuelga del platillo de una balanza, mediante un hilo aislador[2]. Poniendo el aparato en comunicación con el cuerpo cuyo potencial se desea calcular, — por ejemplo con uno de los reóforos de una máquina eléctrica, — se observa inmediatamente la ruptura del equilibrio previamente establecido. El hemisferio superior es rechazado con una fuerza que se puede calcular equilibrándola mediante pesos apropiados, que se echan en el pequeño platillo situado encima de aquél. Sea *f* esta fuerza; es fácil estimarla por el cálculo.

Se ha visto que la capacidad de una esfera es igual á su radio R. Tiénese pues para la carga M : $M = RV$.

La densidad eléctrica — que es uniforme por razón de simetría — tiene pues como valor

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{RV}{4\pi R^2} = \frac{V}{4\pi R};$$

1. En memoria del ilustre físico Volta.

2. Es fácil observar al principio que entre los dos hemisferios hay contacto. Basta introducir, según indica la disposición de la fig. 802, la esfera en el circuito de una pila P con un galvanómetro G : si no hay contacto, el galvanómetro permanece en el cero, porque la corriente de la pila no pasa.

Pero la tensión eléctrica, normal al conductor, tiene como valor en cada punto $T = 2\pi\sigma^2$; luego

$$T = 2\pi \frac{V^2}{16\pi^2 R^2} = \frac{V^2}{8\pi R^2}.$$

La componente vertical es la única eficaz, según el modo de enlace de los órganos del aparato; tiene por valor, en el elemento ΔS,

$$f = T\,\Delta S \cos\alpha;$$

Pero $\Delta S \cos\alpha$ es la proyección de ΔS sobre el plano diametral horizontal; luego $f = T\,\Delta S$. La resultante vertical relativa á la semi-esfera completa es pues

$$F = T.\,S,$$

siendo S la superficie de un círculo máximo [1].

Luego $$F = \frac{V}{8\pi R^2}.\,\pi R^2 = \frac{V^2}{8}.$$

Se ve que el resultado es independiente del radio R de la esfera : se puede, en consecuencia, elegirla bastante pequeña para que no modifique sensiblemente la carga del conductor cuyo potencial se desea determinar.

Observaciones. — 1°. Para evitar la influencia de los cuerpos exteriores, á la vez que se aumenta la fuerza f, M. Lippmann ha rodeado el aparato de una esfera concéntrica (fig. 803), que forma la segunda armadura de un condensador.

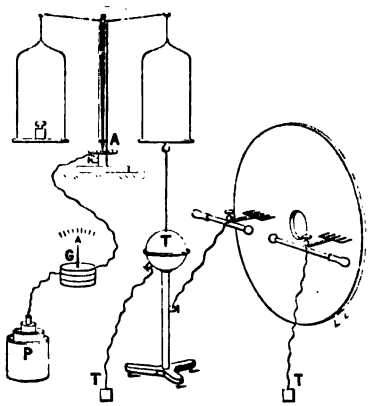


Fig. 802.

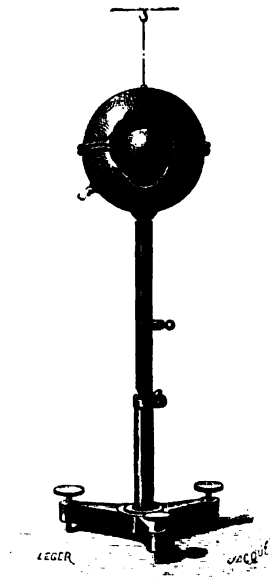


Fig. 803.

2°. Está claro que se puede aumentar la sensibilidad de la medida observando la inclinación del fiel de la balanza por el método óptico de Poggendorff (fig. 805).

3°. *Electrómetro absoluto de Thomson.* — Lord Kelvin (Sir W. Thomson) ha ima-

1. Es el mismo cálculo que permite valorar la presión ejercida por la atmósfera sobre los hemisferios de Magdeburgo.

ginado un electrómetro análogo, en el cual la fuerza medida es la atracción que ejerce la armadura indefinida de un condensador plano sobre un disco cortado en la segunda armadura.

889. **Electrómetro de cuadrantes** (de lord Kelvin). — El electrómetro ordinario de lord Kelvin es el tipo de los *electrómetros relativos* : se le conoce por el nombre de *electrómetro de cuadrantes*. El órgano móvil es una aguja plana C de aluminio (fig. 804), constituída esencialmente por dos cuartos de círculo opuestos, y el órgano fijo consiste en cuatro segmentos iguales A y A', B y B', unidos dos á dos, de una especie de caja cilíndrica plana. Dentro de estos segmentos ó *cuadrantes* es donde se mueve la aguja de aluminio.

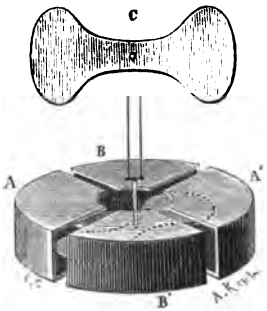


Fig. 804.

Demuéstrase que la desviación α de la aguja está dada por la fórmula general

$$\alpha = K\,(V - V')\left(V_a - \frac{V + V'}{2}\right),$$

siendo K una constante del instrumento, Va el potencial de la aguja, V y V' los de los dos pares de cuadrantes.

Observación. — Se han construído otros varios electrómetros fundados en el mismo principio que éste, entre otros los de Branly y de Mascart. Describiremos el primero como tipo de los electrómetros de cuadrantes simplificados.

Casos particulares. — 1°. Uniendo los dos pares de cuadrantes con los polos de una *pila de carga de m* elementos, cuyo centro esté en el suelo, se tiene

$$V = -V',$$

de donde

$$\alpha = 2\,KVV_a. \qquad [2]$$

2°. Poniendo uno de los pares de cuadrantes en relación con la aguja se tiene

$$V = V_a, \quad \text{de donde} \quad \alpha = \frac{K}{2}\,(V' - V_a)^2. \qquad [3]$$

de donde se sigue que la desviación se efectúa siempre en el mismo sentido, sea cual fuere el signo de la électricidad, que carga al mismo tiempo la aguja y uno de los pares de cuadrantes : este es el método llamado *homostático*.

Las diversas maneras de montar el aparato se utilizan según los casos.

890. **Electrómetro de M. E. Branly.** — *Descripción.* — La aguja es una ancha placa de aluminio *a* (fig. 805) en forma de 8 ; muévese horizontalmente sobre cuatro sectores planos de latón, aislados unos de otros y que forman los cuadrantes de un mismo *círculo ;* estos sectores planos desempeñan el mismo papel que los cuadrantes huecos de Kelvin, y están enlazados como éstos dos á dos en diagonal. El centro de la aguja y el del círculo se encuentran en una misma vertical. La placa móvil está sostenida por un alambre metálico fino que sirve de eje de suspensión y que se prolonga por debajo de la placa en un vástago vertical á que se encuentra fijo un espejo por medio del cual se calcula el ángulo de rotación de la aguja, siguiendo el método de Poggendorff.

El aparato está contenido en una caja cuadrada de vidrio, coronada por un tubo de vidrio donde se adapta una pinza que mantiene el hilo de torsión. Un movimiento lento de esta pinza permite bajar ó subir ligeramente la placa móvil y la pinza puede ser arrastrada por el movimiento del tambor como en la balanza de Coulomb.

Uso. — Supongamos que se trata de medir con el electrómetro la diferencia de potenciales que presentan los dos polos de una pila, ó bien dos puntos cualesquiera D y D' de un conductor atravesado por una corriente.

Empiézase por dar á la placa móvil un potencial auxiliar constante Va, uniéndola por el alambre metálico de suspensión y por la pinza con el polo positivo A

de una pila cuyo polo negativo comunica en T con el suelo[1]. Después se une el punto D por medio de un largo hilo con el sistema de los sectores 1 y 3, que

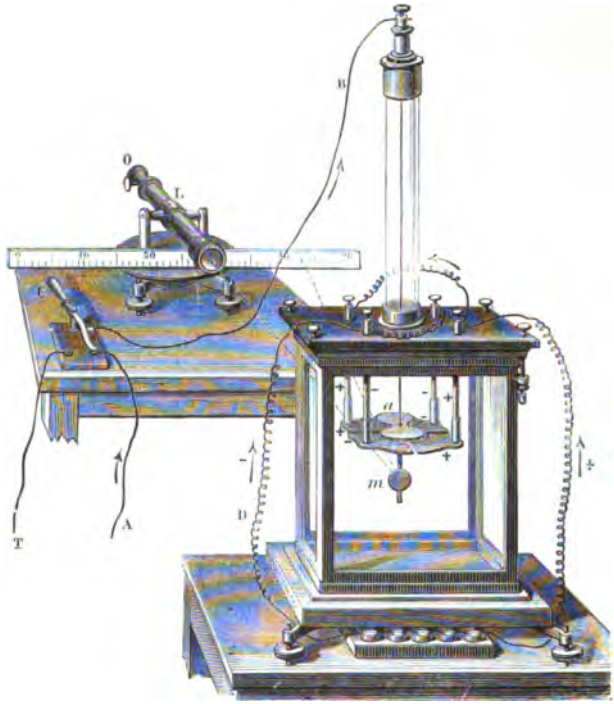


Fig. 805.

adquieren el potencial de D y se enlaza análogamente el otro punto con el sistema de los sectores 2 y 4 que toman el mismo potencial que D' (fig. 806). La placa móvil, cargada positivamente, es atraída entonces por uno de los pares de sectores y rechazada por el otro. Dado cierto ángulo de separación, hay equilibrio entre la fuerza de torsión del hilo y la acción ejercida sobre la placa por los sectores fijos. Sólo falta llevar el valor de α á la fórmula [1] (889).

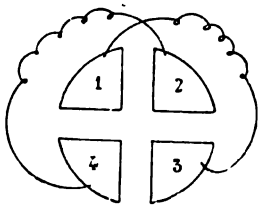


Fig. 806.

Observaciones. — 1°. Antes de proceder á los experimentos, es indispensable arreglar de manera precisa la posición de equilibrio de la aguja. Con tal fin se la vuelve ligeramente por medio del tambor que sostiene la pinza y el alambre metálico, hasta que haya tomado una posición que no varíe cuando se ponen en comunicación con el suelo los cuatro sectores.

1. Branly usa como pila de carga una de agua pura, formada ordinariamente por 100 elementos zinc-cobre, de escasas dimensiones, asociados en serie, y fijos en una peana aisladora de resina ó de caucho endurecido.

2°. En ciertas medidas, por ejemplo cuando se trata de determinar la capacidad de un conductor, es preferible dar á los sectores potencial fijo. Entonces los sectores 1 y 3 son puestos en comunicación con el polo positivo de una pila de agua, y los sectores 2 y 4 con el polo negativo; el centro de esta pila está unido con el suelo. Entonces se pone en comunicación con la placa móvil el conductor que se trata de estudiar. Esta manera de montar corresponde á la fórmula [2] (889).

3°. Se modifica á voluntad la sensibilidad de este electrómetro subiendo ó bajando la aguja por medio de la pinza que sostiene el hilo y variando el número de los elementos de carga. Según M. Branly, es posible apreciar fácilmente y con seguridad diferencias de potencial *inferiores á* $\frac{1}{100}$ *de Daniell.*

4°. Este instrumento, que se usa sobre todo para efectuar medidas comparativas, conserva rigurosamente la misma sensibilidad durante un intervalo de tiempo bastante largo para que se pueda ejecutar una serie de medidas.

5°. También se puede usarlo como electroscopio en los *métodos de reducción á cero.*

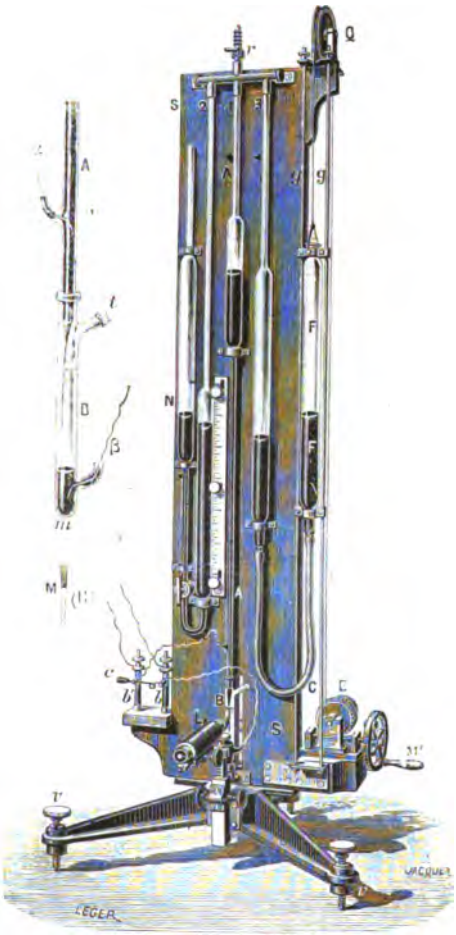


Fig. 807.

891. **Electrómetro capilar de Lippmann.** — *Descripción sumaria.* — Compónese esencialmente de un tubo vertical A, terminado por su parte inferior en una porción afilada de diámetro interior muy pequeño, que se llama la *punta capilar* (fig. 807). El tubo A contiene una columna de mercurio que penetra por su peso en la punta y forma una columna cilíndrica muy capilar *a*, terminada en un menisco hemisférico M (fig. 807, I y II). Esta punta se sumerge en ácido sulfúrico dilatado, que está contenido en una probeta cilíndrica B en cuyo fondo hay una capa de mercurio *m*; el agua acidulada está por una parte en contacto con el mercurio y llena por la otra la extremidad inferior de la punta capilar; moja las paredes de ésta y baña el menisco M. Dos alambres de platino α y β sirven para poner las masas de mercurio A y B en comunicación con dos topes eléctricos aislados *b* y *b'* (fig. 807 y 808), que constituyen los dos *polos* del electrómetro.

Principio. — Los electrómetros descritos anteriormente se fundan en las acciones á distancia que obedecen á la ley de Coulomb. El capilar tiene como principio un fenómeno de contacto. Obsérvase que si se ponen los polos α y β en comunicación metálica uno con otro, por medio del puente metálico C (fig. 808), el menisco M se para en una posición de equilibrio que es el cero del aparato. Si ahora se intercala entre α y β, abriendo el puente, una diferencia de potencial *e*, nótase que el menisco cambia inmediatamente de posición, tomando otra de equilibrio; pues bien *el movimiento del menisco depende de la diferencia de potencial utilizada, y puede en consecuencia servirle de medida.*

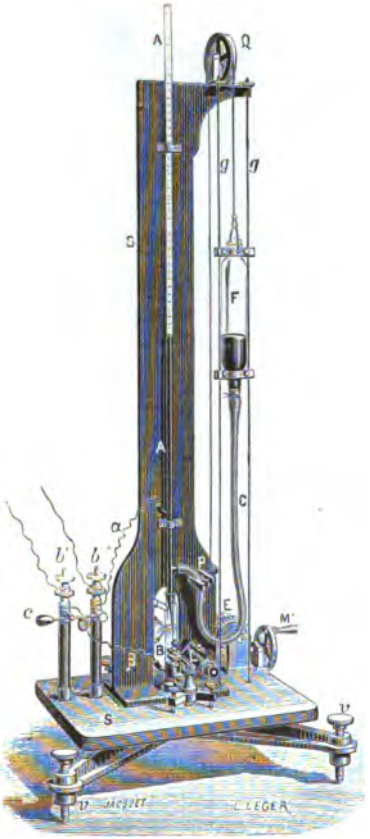


Fig. 808.

Por lo demás, los movimientos del menisco se observan, no á simple vista sino con un microscopio horizontal L (fig. 807) dirigido en una posición fija sobre la punta capilar.

Operación y descripción completa. (Modelo de M. A. Berget). — En vez de medir esta magnitud por el movimiento mismo del menisco, se puede operar de manera distinta. Mediante una *presión compensadora*, obtenida (fig. 807) por el movimiento del depósito F, al elevarse el mercurio en la columna S comprime el aire que está encima de la columna de mercurio A y vuelve el menisco á su nivel primitivo; en este momento se lee el valor de la presión compensadora en un manómetro N, que comunica con la cámara 1 por el tubo 2. Cuando se opera de este modo, se mide la fuerza electro-motora mediante no ya de los movimientos y cambios de lugar, sino de las presiones que ha sido preciso emplear para hacerlos nulos. Abriendo la llave *r* se restablece la presión atmosférica en el aparato.

La figura 807 representa un modelo de electrómetro capilar normal recientemente construído por MM. Chabaud, con arreglo á las indicaciones de M. Berget.

Graduación. — La desviación producida, ó bien la presión compensadora empleada, no depende más que de las diferencias de potencial producidas entre los polos α y β. El aparato se gradúa *empíricamente*, quiere decir que se determinan experimentalmente, sirviéndose de una serie de diferencias de potencial ó de fuerzas electromotoras conocidas, los valores correspondientes de la presión compensadora.

Modelo de M. G. Limb. — Para el buen funcionamiento del aparato, importa que la punta capilar sea bien mojada interiormente por el ácido dilatado. Á fin de que siempre ocurra así, M. Limb hace el tubo A solidario de un frasco F, que contiene mercurio, y esto mediante un tubo de caucho C provisto de una pinza de compresión P (fig. 808). Después de la experiencia se baja el frasco á lo largo

e las correderas *g* gracias al manubrio M', á los engranajes E y á la polea Q, de modo que reciba el mercurio de la columna. Como el menisco deja de estar oprimido, vuelve á subir hasta una región más ancha del tubo y el ácido dilatado va detrás. Esta ingeniosa disposición evita también la formación de cristales en las regiones útiles de la punta y permite hacer variar fácilmente la presión.

Sensibilidad del instrumento. — El electrómetro capilar permite apreciar el *diezmilésimo* próximamente de la fuerza electromotora de un elemento Daniell. Además, sus indicaciones son instantáneas : la columna de mercurio toma inmediatamente y sin oscilaciones la posición de equilibrio que le conviene[1]. Por el contrario, no puede servir directamente en la medida de las fuerzas electromotoras superiores á un Daniell ; y precisa emplearlo sólo en un sentido determinado, quiere decir, poner el polo β en comunicación con el negativo del elemento que se trata de medir. Este es un ligerísimo inconveniente, pues el electrómetro de Lippmann se utiliza sobre todo como *aparato de cero*, quiere decir, para probar la igualdad de dos potenciales.

Observación. — Si bien la masa del mercurio A está en contacto con el ácido sulfúrico dilatado, condúcese como si estuviera eléctricamente aislada de él. Así, cuando después de haber puesto los polos α y β en comunicación con los de una pila, se suprimen las comunicaciones, el potencial alcanzado por A no varía, como tampoco la posición del mercurio. Por la misma razón, el electrómetro capilar es sensible á la aproximación de una barra de resina frotada, y la columna de mercurio sigue á distancia todos los movimientos del cuerpo electrizado.

Teoría. — Hay que considerar las acciones que ocurren en el menisco M, donde el mercurio está en contacto con el agua acidulada (fig. 807, II). Cuando se intercala entre α y β una fuerza electromotora, tal como un elemento Daniell, el menisco M se polariza, quiere decir que hace en él una fuerza electromotora capaz de equilibrar la del elemento y de impedir el paso de la corriente[2]. (Precisa únicamente que la fuerza electromotora no sea muy superior á un Daniell, pues de otro modo no queda equilibrada : la corriente pasa y el agua acidulada se descompone.) La fuerza electromotora antagónica así desarrollada es precisamente igual á la fuerza electromotora *e*, que equilibra ; llámasela *fuerza electromotora de polarización*. Por otra parte, el menisco M es lugar de fuerzas capilares, que tiene como efecto sostener la columna A, que á efecto de su peso tiende á salir por la punta capilar. Demuéstrase que la resultante de estas fuerzas equivale á una presión *h* procedente de la *tensión superficial*, y que tendría como valor

$$h = \frac{2A}{\rho}, \qquad [1]$$

siendo ρ el radio del menisco hemisférico M, y A la *constante capilar*, que depende del estado de la superficie mercurial. Cuando ésta se polariza, A varía, y según lo ha demostrado M. Lippmann, A *es una función continua de e*. De aquí se sigue, según la fórmula [1], que *h es también función de e*. Cuando se lleva el menisco á ocupar siempre la misma posición en la punta, se reduce á su radio ρ á tener siempre el mismo valor ; de aquí se sigue, según la fórmula [1], que el valor de *h* debe variar como el de A, es decir que *la presión que hay que ejercer sobre el mercurio es función de la fuerza electromotora e*. Por este motivo, las presiones compensadoras corresponden, según antes se ha dicho, á las fuerzas electromotoras que se intercalan entre α y β, y que se trata de calcular.

1. La columna de mercurio obedece con tal rapidez a los cambios de fuerza electromotora que, si se intercala el electrómetro en un circuito telefónico, la columna vibra según haría la placa de un teléfono ; y como estas vibraciones se comunican por reacción á la peana del aparato, si se aplica el oído sobre ésta óyense los sonidos musicales ó la palabra articulada como en un receptor telefónico.

2. Más adelante estudiaremos este fenómeno, llamado *polarización de los eléctrodos*.

LIBRO XI

ELECTRICIDAD DINÁMICA

CAPÍTULO PRIMERO

PILA VOLTAICA.

HISTORIA Y GENERALIDADES.

892. **Pilas voltaicas.** — Se da el nombre de *pilas voltaicas* á unos manantiales de energía eléctrica alimentados por reacciones químicas.

1°. *Pila de Volta ó pila de columnas.* — El primer aparato de este género fué imaginado por Volta en 1800. Componíase de una serie de discos dobles de *cobre* y *zinc* soldados y *puestos en pila* unos sobre otros, aunque estaban separados por rodajas de paño empapadas en agua acidulada; la *pila* estaba mantenida entre tres columnas de vidrio (fig. 809) : á esta circunstancia debe su nombre.

2°. *Modificaciones de la pila de Volta.* — La pila de Volta fué objeto desde el principio de diversas modificaciones destinadas á hacer más cómoda su manipulación y á impedir que el ácido fuera expulsado de las rodajas de paño por la acción de los discos. Citemos la pila de artesa de Cruikshank, que no es en resumen sino una pila de Volta horizontal, y la *pila de Wollaston* (fig. 812), en la cual están los pares colocados en una serie de vasos independientes.

3°. *Estudio experimental. — La pila es un manantial de electricidad: Carga de los condensadores.* — Consideremos una pila de vasos independientes (fig. 811). Es fácil probar primero que un sistema semejante es un *foco de electricidad.* En efecto, poniendo las armaduras A y B de un electrómetro condensador en comunicación respectiva con los cobres extremos P y P′ (*polos de la pila*), se observa que éste se carga, pues las hojas de oro divergen desde que se retira el platillo B. Si M es la carga tomada por A y C la capacidad del condensador, la diferencia de potencial V que existe entre P y P′ tiene evidentemente como valor

$$V = \frac{M}{C}.$$

4° *Fuerza electromotora y corriente eléctrica.* — Esta experiencia prueba perfectamente que el aparato llamado *pila* es lugar donde reside una causa capaz de separar los fluidos eléctricos, de mover-

Fig. 809.

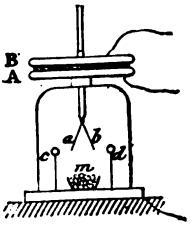


Fig. 810.

los: eso es lo que se llama una *fuerza electromotora.*

Si se suprime el aislador entre A y B, el circuito cerrado constituido por el alambre

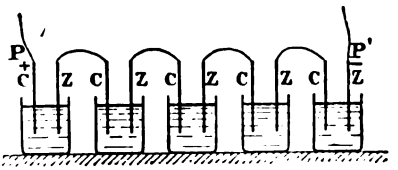


Fig. 811.

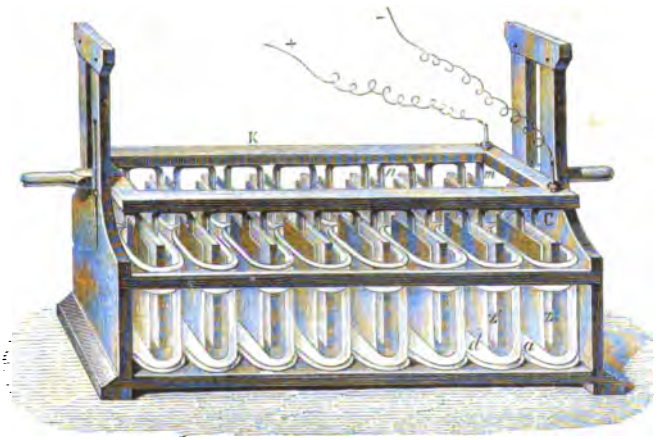


Fig. 812.

que une los polos, por el líquido de las pilas y por los alambres

de unión de los zincs y de los cobres, se convierte *de todo punto* en lugar donde residen propiedades nuevas : desviación de una aguja imantada cercana, elevación de la temperatura del circuito, descomposición de ciertos compuestos disueltos ó intercalados en el circuito, etc. Entonces se dice abreviando que el circuito es recorrido por una *corriente eléctrica*. Estos efectos pueden ser evidentemente considerados como debidos al movimiento de la electricidad que se efectúa á través de los conductores, y es posible medir *la intensidad* de esta corriente por la *cantidad de electricidad que atraviesa una sección cualquiera del circuito durante la unidad de tiempo.*

893. **Historia de la pila.** — *Experiencias de Galvani.* — El descubrimiento de la pila tuvo como origen un célebre experimento de Galvani, que se puede repetir fácilmente de la manera que sigue. Quítase la piel á una rana viva, córtasela por debajo de los miembros anteriores (fig. 813), y después se ponen al descubierto los nervios lumbares, que se distinguen á ambos lados de la columna ver-

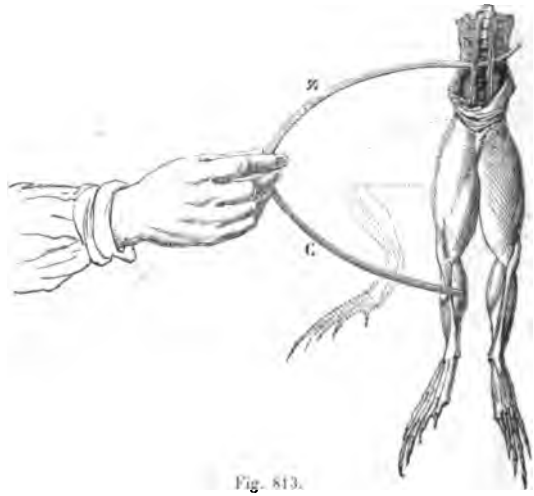


Fig. 813.

tebral en orma de filetes blancos. Entonces se toma un arco metálico formado por dos metales, zinc y cobre, é introduciendo uno de sus brazos entre los nervios y la columna vertebral, se tocan con el otro los músculos de uno de los muslos ó de una pierna. Á cada contacto se observa que los músculos se contraen y se agitan, como si esta mitad de la rana volviera á la vida.

Galvani, que desde 1780 había producido con la electricidad de las máquinas eléctricas conmociones análogas en las ranas muertas, atribuyó el fenómeno á la existencia de un fluido inherente al animal, admitiendo : 1°. que esta electricidad se desarrollaba por efecto de la vida y cargaba los nervios y los músculos como armaduras de botellas de Leyden ; 2°. que el arco metálico no servía más que de excitador para producir la descarga y la contracción.

Llamó á esta nueva electricidad *fluido vital*, y aun hoy se la llama *electricidad animal* ó *fluido galvánico*. Gran número de científicos, sobre todo los fisiólogos, admitieron la doctrina de Galvani ; pero ésta tuvo inmediatamente adversarios, siendo el más ardoroso Volta, profesor de física en Pavía.

2°. *Experiencias de Volta.* — La atención de Galvani se fijó exclusivamente en

los nervios y músculos de la rana; la de Volta estudió *los metales que sirven para establecer la comunicación* atribuyéndoles el principal papel en el fenómeno. Fundóse para ello en el hecho de que la contracción muscular es mucho más enérgica cuando el arco metálico está formado por dos metales heterogéneos que cuando se trata de uno mismo. Y admitió : 1°. que el desprendimiento de electricidad era consecuencia del efecto mismo de su contacto : 2°. que los órganos del animal no desempeñaban sino el papel secundario de conductor, y al mismo tiempo el de electroscopio muy sensible.

Por medio del electroscopio condensador que entonces inventó, pudo Volta efectuar numerosos experimentos, probando el desarrollo de la electricidad por el contacto de los metales ; los siguientes son fundamentales.

1°. Se toma un sistema de discos, uno de cobre y el otro de zinc, fijos en mangos aisladores. Poniendo en contacto esos discos y separándolos después, se observa que están cargados, positivamente el zinc y negativamente el cobre.

2°. Teniendo en la mano la extremidad cobre de una lámina zinc-cobre, y tocando el platillo de cobre del electroscopio (fig. 766) con la extremidad zinc, no se observa ningún signo de electrización. Si se tiene en la mano el zinc, aquel aparato se carga.

3°. Si se repite esta última experiencia interponiendo entre el platillo y la lámina de zinc una rodaja de paño mojada con agua acidulada, el platillo se carga *positivamente*.

Volta dedujo del primer experimento que por el *contacto* del zinc y del cobre se origina una *fuerza electromotora*, en virtud de la cual el zinc se carga de electricidad positiva y de negativa el cobre. Según él, la segunda experiencia confirmaba la primera : como la lámina de zinc estaba en contacto con el cobre por sus dos extremos, debían producirse dos fuerzas electromotoras opuestas cuya suma algébrica era *nula*. Por fin, en la tercera experiencia, nace una fuerza electromotora por contacto entre el cobre y el zinc ; este último metal se electriza positivamente, y la rodaja acidulada, que sólo actúa como conductor, por lo menos en apariencia, transmite al platillo la electricidad del zinc.

894. **Distribución de los potenciales en la pila de Volta.** — Admitamos con Volta el principio siguiente :

Dos cuerpos heterogéneos en contacto y en equilibrio eléctrico presentan, á temperatura dada, una diferencia de potenciales característica del par ; esta diferencia es independiente de la forma y del volumen de los cuerpos, así como de la extensión del contacto y del potencial inicial á que puede ser mantenido uno de los pares del par.

Represéntase ordinariamente por el símbolo M | N la variación de potencial que se observa yendo de M hacia N, hallándose en contacto los dos cuerpos M y N.

Designemos por C_1, C_2..., etc., Z_1, Z_2, etc., los cobres y los zincs sucesivos encontrados siguiendo de izquierda á derecha la serie de los elementos de una pila, y por L el líquido interpuesto. Si V es el potencial del cobre C_1, el del cobre C_2 será, según el principio de Volta,

$$V + C_1 \mid L + L \mid Z_1 + Z_1 \mid C_2.$$

El potencial en C_3 será análogamente

$$[1] \quad V + \underbrace{C_1 \mid L + L \mid Z_1 + Z_1 \mid C_2} + \underbrace{C_2 \mid L + L \mid Z_2 + Z_2 \mid C_3}.$$

Ahora bien, en virtud de la segunda parte del principo enunciado anteriormente, es claro que las sumas subrayadas son iguales. Si *e*

es su valor común, el potencial V' en C_{n+1} tendrá como valor

$$V + ne.$$

Tiénese pues

$$V' = V + ne,$$

de donde

$$V' - V = ne.$$

Este valor es el mismo sean cuales fueren la forma, la posición y dimensiones de los eléctrodos y de los conductores de unión. Únicamente influye en ella la naturaleza de los eléctrodos y de los líquidos.

La diferencia de potenciales presentada por los polos de una pila de n elementos idénticos y en equilibrio eléctrico, es pues igual á n veces la diferencia de potenciales propia de un solo elemento.

Observaciones. — 1°. Está claro que poniendo en el suelo el cobre de unión que sigue al K^ésimo^ elemento, como éstos se cuentan yendo de izquierda á derecha, los dos polos C_1 y C_{n+1} tomarían respectivamente los potenciales

$$-Ke \quad \text{y} \quad -(n-K)\,e,$$

siendo n el número de los elementos.

Pára $K = \frac{n}{2}$, los potenciales de los polos éstarían equidistantes del potencial del suelo, es decir, serían iguales y de signo contrario.

2°. El condensador AB se carga en virtud de la fuerza electromotora ne. La energía eléctrica $\frac{1}{2}$ M (V — V') ó $\frac{C\,(ne)^2}{2}$ acumulada por el condensador se ha tomado de las *reacciones químicas* que origina la clausura del circuito en el condensador, ó sobre sí mismo cuando se trata de una corriente.

Si la cadena no contuviera más que sólidos inalterables á temperatura uniforme, el principio de la conservación de la energía prueba, y así lo confirma la experiencia, que sería imposible cargar con ella un condensador.

3°. Si los alambres, atados á los polos C_1 y C_{n+1} están constituídos por un mismo metal m, será preciso, llamando V al potencial de m hacia la izquierda, añadir á $V + ne$ las diferencias $m \mid C_1$ y $C_J \mid m$, que son evidentemente iguales y de signos contrarios, según el principio del contacto. Luego la diferencia de potenciales es independiente de la naturaleza del metal m de las extremidades ó polos de la pila.

895. **Definiciones fundamentales.** — *Polos positivo y negativo.* — Conviene llamar *polo positivo* á la extremidad de la pila que tiene potencial más elevado; el otro extremo es el *polo negativo.*

De esta definición y de los principios de la electrostática resulta que si la armadura de un condensador está unida al polo positivo, se carga de electricidad positiva, mientras que la otra, enlazada con

el polo negativo, se carga de una cantidad igual de electricidad negativa (principio de la conservación de la electricidad).

Fuerza electromotora y diferencia de potenciales. — Las cargas positiva y negativa de los polos determinan un campo que tiende á mover la electricidad positiva en la pila en sentido inverso de aquel en que actúa la fuerza electromotora de la pila. Hay pues equilibrio eléctrico así que las cargas polares son suficientes para contrabalancear la acción de esta fuerza electromotora. En otros términos, ésta es igual y de sentido contrario á la fuerza electromotora debida á la diferencia de potenciales presentada por los dos polos : de este modo la acción del peso que comprime un muelle es igual y de signo contrario á la reacción del muelle.

Sentido de la corriente. — *Conviniendo* en llevar el sentido de los movimientos hacia la electricidad positiva, sábese que éstos se efectúan siempre en la dirección de los *potenciales decrecientes :* la corriente se dirigirá pues desde el polo + al polo — (fig. 814) exteriormente á la pila. El polo negativo se encuentra siempre en relación con el metal (ó eléctrodo) atacado por el líquido; en las pilas comunes es el zinc. La corriente tiene como causa la existencia de la fuerza electromotora *ne*, suministrada por los contactos de la cadena de los conductores que constituyen la pila, y está alimentada por las reacciones químicas que se producen en los elementos.

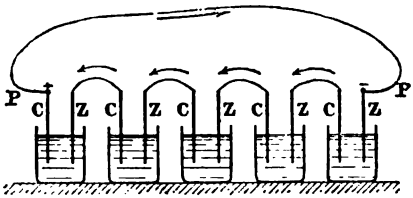


Fig. 814.

Intensidad de la corriente. — Mídese la intensidad de las corrientes (definida antes, 892, 4°) por medio de una unidad que se explicará más adelante y que ha recibido el nombre de *ampère*.

CAPÍTULO II

CONDUCTIBILIDAD ELÉCTRICA. — LEYES DE POUILLET. FÓRMULA DE OHM.

896. Definiciones. — *Conductibilidad eléctrica.* — La experiencia prueba que la intensidad de una corriente eléctrica varía cuando se modifica el circuito cerrado que esa corriente recorre. Dada una pila superpuesta siempre *idéntica á sí misma*, la intensidad de la corriente que suministra, esto es, la cantidad de electricidad que circula en un

segundo á través de una sección del circuito, depende de la sustancia, de la sección y de la longitud de este circuito. El estudio de las relaciones que existen entre la intensidad de una corriente y los elementos del circuito constituye el problema de la *conductibilidad eléctrica.*

Este problema ha sido tratado por dos métodos : 1°. el experimental, aplicado por Pouillet, y que ha dado las leyes que llevan su nombre; 2°. el método analítico, método *a priori* aplicado por Ohm, que ha permitido conocer las leyes de la conductibilidad eléctrica comprendidas en la fórmula de *Ohm.* Por lo demás, estos resultados se encuentran enteramente acordes con los del método experimental : las leyes de Pouillet los confirman, y recíprocamente.

897. **Ley de los conductores equivalentes.** — Si se ponen en comunicación los dos polos de una pila por medio de un circuito metálico, llamado *circuito interpolar*, se observa por medio de un *reómetro*[1] cualquiera que la corriente tiene cierta intensidad. Si se aumenta la longitud del circuito, ó se pone un alambre fino en vez de uno grueso de la misma sustancia, se nota que la intensidad I de la corriente disminuye mucho, convirtiéndose en $I' < I$. La debilitación es incomparablemente mayor cuando se reemplaza una pequeña porción del circuito metálico por una columna de un líquido conductor.

Antes de Pouillet, Davy fué el primero que comparó los diferentes conductores en lo tocante á la variación que hacen experimentar á la intensidad de una corriente, cuando se les introduce en el circuito interpolar. De este modo formuló la ley siguiente, que se llama *ley de los conductores equivalentes :*

La variación de la corriente producida por dos conductores de la misma sustancia, introducidos sucesivamente en un mismo circuito, es idéntica cuando sus longitudes y secciones se encuentran en la misma proporción, esto es, cuando se tiene

$$[1] \qquad \frac{l}{l'} = \frac{s}{s'}, \qquad \text{ó} \qquad \frac{l}{s} = \frac{l'}{s'}.$$

Entonces se dice que estos dos alambres son *equivalentes,* quiere decir, que *se equivalen* en el punto de vista de su efecto sobre la corriente.

898. **Consecuencias de la ley de los conductores equivalentes.** — 1°. *Longitud reducida.* — Por ejemplo, si el segundo alambre introducido tiene una sección igual á la unidad de superficie, ó sea 1 mm², se deduce de la fórmula [1] que debe dársele una longitud $\lambda = \frac{l}{s}$ para que sea *equivalente* al primer alambre.

λ es lo que se llama la *longitud reducida* del alambre (l, s).

Dada una serie de alambres (l, s), (l', s'), (l'', s''), ... de sustancias

1. *Reómetro* significa instrumento medidor de la intensidad de las corrientes (de ῥέω, manar, y μέτρον, medida).

diferentes, se tendrán inmediatamente sus *longitudes reducidas* haciendo $\lambda = \frac{l}{s}$, $\lambda' = \frac{l'}{s'}$, ...

λ, λ', λ'' representan las longitudes de los alambres, de sección 1, *equivalentes* á los alambres considerados y de la misma sustancia que ellos.

2°. *Resistencias.* — Estas *longitudes reducidas* no son comparables entre sí, porque son de sustancias diferentes. Se ha tratado de hacerlos comparables refiriéndolos todos á longitudes de una misma sustancia, tomada como término de comparación.

Sea un alambre (l, s), de sustancia cualquiera, por ejemplo de cobre; veamos cual es la longitud de una columna de mercurio de 1 milímetro cuadrado de sección que le sea equivalente. En vez de hallar $\frac{l}{s}$ como longitud de la columna de mercurio equivalente, hallaremos $\frac{l}{cs}$, siendo c un coeficiente dado. Llamando r esta longitud de mercurio tendremos $r = \frac{l}{cs}$. Para otro alambre $(l' s')$ de la *misma sustancia*, hallaríamos $r' = \frac{l'}{cs}$, y el coeficiente c sería el mismo, pues sólo depende de la sustancia. Para un alambre $(l_1\ s_1)$ de otra sustancia, por ejemplo de maillechort, tendríamos $r_1 = \frac{l_1}{c_1\ s_1}$. Los coeficientes r, r', r_1 ... se llaman *longitudes reducidas al mercurio* ó, más comunmente, *resistencias* de los alambres (l, s), (l', s'), $(l_1\ s_1)$....

3°. *Coeficientes de conductibilidad.* — Cuanto á las constantes c, c_1..., se les llama *coeficientes de conductibilidad* del cobre, del maillechort, etc. Es fácil comprender la significación física de estos coeficientes. Si se tratara de averiguar la *longitud reducida á mercurio* de un alambre de cobre de sección 1 y de longitud 1, se hallaría $\rho = \frac{1}{c}$.

Por consiguiente, la longitud ρ de la columna de mercurio equivalente varía en razón inversa de este coeficiente c; de manera que éste es *característico* de la conductibilidad de la sustancia: de ahí su nombre.

4°. *Leyes de la resistencia.* — La fórmula anterior

$$r = \frac{l}{cs}.$$

comprende *las leyes de la resistencia.* Obsérvase que la *longitud reducida á mercurio* ó la *resistencia* de un conductor metálico es:

1°. Proporcional á la longitud;

2°. Inversamente proporcional á la sección;

3°. Inversamente proporcional al coeficiente de conductibilidad.

899. Unidades de resistencia eléctrica : unidad absoluta y unidad práctica (*Ohm*). — La resistencia eléctrica se ha referido á las unidades fundamentales : centímetro, gramo, segundo. La unidad de resistencia, así definida se llama *unidad absoluta* ó unidad C. G. S. Como esta unidad es sumamente pequeña, se usa en la práctica otra secundaria, que vale *cien millones de unidades* absolutas, y que se llama *ohm*[1]. Todas las resistencias se calculan en *ohms*, como las capacidades en *farads*, los potenciales en *volts* y las cantidades de electricidad en *coulombs*.

El ohm se ha realizado materialmente como el metro, construyéndose un *ohm-tipo*, á la manera que hay un *metro-tipo*.

El ohm-tipo legal es exactamente la resistencia á 0° de una columna de mercurio que tenga una sección de 1 milímetro cuadrado y una longitud de 106 centímetros[2].

900. Experiencias de Pouillet. — Ley de las corrientes termo-eléctricas. — Pouillet empezó por estudiar el caso sencillo de las corrientes termo-eléctricas. Ya hemos dicho que se llama *elemento termo-eléctrico* un sistema electromotor formado, pongamos por ejemplo, de dos vástagos de cobre soldados en los extremos de un vástago de bismuto (fig. 815). Cuando se mantiene una de las soldaduras á 100° y la otra á 0°, se obtiene una corriente.

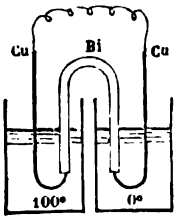


Fig. 815.

Pouillet tomó pues uno de estos elementos y reunió sus dos polos sucesivamente por una serie de alambres conductores cuyas *longitudes reducidas al mercurio*, r, r', r''..., determinó de antemano. Midió por medio de un reómetro la intensidad que adquiere la corriente en cada caso, y así obtuvo i, i', i''... Comparando entre sí estas dos series de valores, obtuvo la ley siguiente :

Ley. — *El producto de la resistencia del alambre interpolar por la intensidad correspondiente de la corriente es un número constante para un mismo elemento*, quiere decir

$$ir = i'r' = i''r'' = \text{constante}.$$

Sea E este producto constante, característico del elemento; tiénese

$$[1] \qquad ir = E, \qquad \text{de donde} \qquad i = \frac{E}{r}.$$

Esta fórmula prueba que la *intensidad de una corriente termo-eléctrica* es inversamente proporcional á la *longitud reducida* del conductor interpolar. Mientras mayor es esta *longitud reducida*, más

1. En recuerdo del físico alemán Ohm.
2. La resistencia de un ohm es *poco más ó menos* la de 100 m de alambre de hierro telegráfico de 4 mm. de diámetro, ó bien de 48 m. de alambre de cobre de 1 mm de diámetro.

escasa es la intensidad. De modo que el conductor interpolar actúa como obstáculo al paso de la corriente. De ahí el nombre de *resistencia* que se da más comunmente á la *longitud reducida al mercurio.*

901. **Ley de las corrientes hidro-eléctricas.** — Pouillet repitió los mismos experimentos de medida con un elemento hidro-eléctrico apropiado. Reunió sucesivamente los dos polos á conductores de resistencias variables, r, r'... determinadas de antemano. En cada uno de los circuitos introducía un reómetro cuya resistencia era *despreciable* respecto de la del circuito total : así tenía i, i' i''... Comparando estas dos series de valores, dedujo su segunda ley :

Ley. — *El producto de la intensidad de la corriente por la suma* $r + R$ *es un número constante para un mismo elemento de pila que se supone invariable* (siendo r la resistencia del circuito interpolar y R una constante que depende del elemento) :

$$i\,(r + R) = i'\,(r' + R) = i''\,(r'' + R) = \text{constante}$$

Sea E el valor de este producto ; tiénese

$$i\,(R + r) = E. \qquad \text{de donde} \qquad i = \frac{E}{R + r}.$$

902. **Constantes de un elemento voltaico.** — Se ve que la intensidad de la corriente suministrada por un elemento voltaico cualquiera está *determinada* por los dos coeficientes constantes R y E. Esto es lo que se denomina las *constantes* del elemento.

Resistencia interior. — La constante R, variable con la forma, las dimensiones y la posición de los *eléctrodos*, desempeña en la fórmula el mismo papel que r; se puede en consecuencia asimilarla á una resistencia propia del elemento de la pila. Llámasela, en efecto, *resistencia interior* del elemento.

La experiencia prueba por lo demás que esta asimilación tiene fundamento, pues modificando las superficies polares de un elemento de modo que disminuya ó aumente su resistencia, se disminuye ó se aumenta R, según la fórmula $r = \frac{l}{cs}$.

Fuerza electromotora. — La constante E, característica de la naturaleza de los cuerpos que constituyen el elemento, se ha llamado *fuerza electromotora.* Obsérvese que si la suma de las dos resistencias $(R + r)$ se hiciera igual á la unidad de resistencia, la intensidad nueva sería precisamente igual á E.

Por consiguiente, la fuerza electromotora de un elemento está dada por el mismo número que *la intensidad de la corriente que suministraría este elemento si la suma de las resistencias* (*interior y exterior*) *fuera igual á la unidad*

Observación. — La sencillez de las experiencias de Pouillet relativas á los pares termo-eléctricos se debía precisamente á que su resis-

tencia interior, formada por las barras y láminas empleadas era despreciable.

903. **Reunión de las pilas.** — Dado cierto número de elementos de pila, se puede asociarlos, ó según la expresión más común, *parearlos* de distintas maneras.

Consideremos, por ejemplo, el caso de seis elementos voltaicos[1]. Pueden formarse cuatro combinaciones:

1°. Reunir los elementos por sus polos de nombres contrarios, según hizo Volta, formando larga serie longitudinal (fig. 816), en que

Fig. 816.

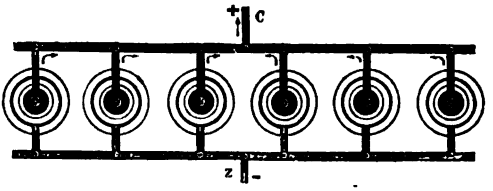


Fig. 817.

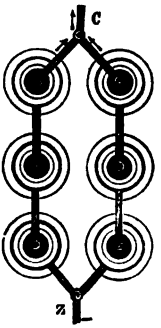


Fig. 818.

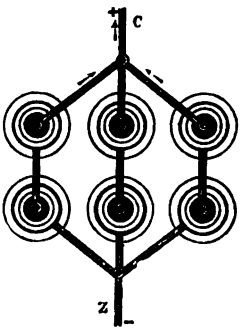


Fig. 819.

C representa el polo positivo y Z el negativo: esta es la asociación *en serie* ó *en tensión*.

2°. Pueden asociarse los seis elementos como se asocian las jarras de una batería eléctrica, esto es, reuniendo por una parte todos los polos positivos y por otra todos los negativos (fig. 817). Entonces se obtiene una nueva forma de pila, cuyo polo positivo está en C,

1. Representaremos el polo positivo de cada uno de ellos por un pequeño círculo blanco sombreado, y el negativo por una circunferencia negra de mayor diámetro (fig. 816-818).

quiere decir, en un punto cualquiera de la línea de unión de los seis polos positivos, y cuyo polo negativo se encuentra en Z, esto es, en un punto cualquiera de la línea de reunión de los seis polos negativos. Esta es la asociación en *batería*, en *superficie* ó *cantidad*.

3°. y 4°. Se pueden formar primero sea dos series paralelas de tres pares cada una (fig. 818), sea tres series paralelas de dos pares cada una (fig. 819) reuniendo después en un mismo punto los eléctrodos positivos de las dos series, y sus eléctrodos negativos en un mismo punto Z. De este modo se tienen dos nuevas *pilas*, cuyos polos son C y Z; este es el pareado *mixto*, en serie y en tensión.

Con doce elementos se podrían realizar seis combinaciones distintas, y así sucesivamente á medida que se toma mayor número de elementos. Pero no obstante estas combinaciones variadas, sólo hay en realidad tres modos distintos de *parear* ó reunir las pilas.

904. **Constantes de una pila: Experiencias de Pouillet.** — Á cada agrupación corresponde una *fuerza electromotora total* y una *resistencia interior total* que determinan la intensidad de la corriente que resulta dado el circuito interpolar. Pouillet determinó en cada caso la relación que existe entre estas *constantes* de la pila y las *constantes* de los elementos.

Con tal objeto tomó seis elementos, idénticos en cuanto era posible, y determinó las constantes para cada uno de ellos. En general estas constantes no eran absolutamente iguales, pero se diferenciaban poco unas de otras. Teníase e, e', e'',... y ρ, ρ', ρ'',...

Formó con estos seis elementos una pila: 1°. reuniéndolos en serie; 2°. reuniéndolos en batería; 3°. reuniéndolos al mismo tiempo de los dos modos.

En todos los casos halló la ley general

$$I(R + r) = I'(R + r').$$

Por consiguiente, en el caso de una pila montada de una manera cualquiera, según ocurre en el de un solo elemento, la intensidad de la corriente se expresa por la fórmula

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

E y R son las *constantes* de la pila. Determinándolas en cada caso, halló que tenían valores diferentes según el arreglo de los elementos.

1°. *Pila en serie.* $E = e + e' + \ldots = \Sigma(e)$,
$R = \rho + \rho' + \ldots = \Sigma(\rho)$.

En el caso de que se supongan iguales los dos elementos, las fórmulas pasan á ser

$$E = 6e, \quad R = 6\rho \quad \text{é} \quad I = \frac{6e}{6\rho + r}.$$

Observaciones. — 1°. Si la resistencia exterior r es pequeña respecto de ρ, la intensidad de la corriente es sensiblemente igual á $\frac{e}{\rho}$: es pues la misma que si se utilizara un elemento de pila nada más.

2°. Haciendo variar r desde o hasta el ∞, I varía de $\frac{e}{\rho}$ á o. Por ejemplo, si una pila tiene una fuerza electromotora de 2 volts y una resistencia interior igual á $\frac{1}{100}$ de ohm, podrá suministrar todas las intensidades de la corriente comprendidas entre 200 ampères y o: basta para ello elegir un circuito exterior apropiado.

2°. *Pila en batería.* — Suponiendo que los elementos sean idénticos, Pouillet obtuvo

$$E = e \quad \text{y} \quad R = \frac{\rho}{6} \quad \text{y la fórmula} \quad I = \frac{6\,e}{\rho + 6\,r}.$$

3°. *Pila mixta.* — Siendo n el número de elementos en general, pueden reunirse p en batería y juntar estas baterías á su vez en una serie de q elementos múltiples, de tal manera que se tenga $pq = n$.

Entonces se encuentra que $E = qe$ y $R = \frac{\rho}{p}$ y por consiguiente

$$I = \frac{q\,E}{\frac{\rho}{p} + r}.$$

Por ejemplo, para una serie de tres baterías de dos elementos cada una, tendremos

$$I = \frac{3\,e}{\frac{\rho}{2} + r}.$$

Observación. — Todos estos resultados están acordes con la ley de los contactos de Volta y con la fórmula $r = \frac{l}{cs}$.

905. **Comparación entre los diversos modos de reunión.** — Las leyes de Pouillet y las fórmulas que las expresan permiten determinar cual es el modo de reunión más ventajoso, dado un número determinado de elementos, cuando se trata de hacer trabajar la pila en un circuito exterior de resistencia conocida.

Para n pares, la fuerza electromotora e y de resistencia interior ρ, montados en serie, la intensidad I está dada por la fórmula

$$I = \frac{ne}{n\rho + r}.$$

Si los mismos pares están montados en batería, se tiene

$$I = \frac{e}{\frac{\rho}{n} + r} = \frac{ne}{\rho + nr}.$$

Estas dos fórmulas pueden escribirse así:

$$I = \frac{ne}{(r + \rho) + (n - 1)\rho} \quad \text{y} \quad I' = \frac{ne}{(r + \rho) + (n - 1)\,r}.$$

donde los numeradores son iguales mientras los denominadores tienen una parte común $r + \rho$. Por consiguiente, si $r = \rho$, los dos denominadores son iguales y se tiene $I = I'$; si $r > \rho$, se tiene $I' < I$, y para $r < \rho$ se encuentra $I' > I$.

Hay pues ventaja en montar la pila en batería cuando la resistencia exterior es *pequeña*, y en serie *si el caso es contrario*.

Régla general. — El efecto máximum de una pila se obtiene por una reunión tal, que la resistencia exterior sea igual á la interior.

En efecto, supongamos el caso general de N elementos asociados en k series paralelas de n elementos cada una. Según las leyes de Pouillet, cada serie tiene una fuerza electromotora ne y una resistencia $n\rho$, y para k series montadas en batería, como la resistencia es k veces menor, se tiene

$$[1] \qquad I = \frac{ne}{r + \frac{n\rho}{k}} \quad ó \quad I = \frac{kne}{kr + n\rho} = \frac{Ne}{kr + \frac{kn\rho}{k}} = \frac{NE}{kr + \frac{N\rho}{k}}.$$

El valor de I será evidentemente máximum cuando el denominador $kr + \frac{N\rho}{k}$ sea mínimum. Pero este denominador es la suma de dos términos cuyo producto es constante :

$$kr \times \frac{N}{k} = Nr\rho;$$

luego su mínimum ocurre cuando los dos términos de la suma son iguales, quiere decir cuando se tiene

$$kr = \frac{N\rho}{k}, \qquad \text{de donde} \qquad r = \frac{n\rho}{k}.$$

El máximum de I ocurre pues *cuando la resistencia interior de la pila es igual á la resistencia total del circuito exterior.*

906. **Teoría y fórmula de Ohm.** — 1°. *Principio del cálculo* (fig. 820). — Antes que Pouillet — quien por lo demás no lo sabia, — ya el físico alemán Ohm trató por el cálculo el problema de la conductibilidad eléctrica. Limitóse á aplicar á la propagación de la electricidad por un alambre conductor los cálculos de Fourier sobre la propagación del calor por conductibilidad. Partiendo de las mismas hipótesis obtuvo los mismos resultados, que se expresaron en la misma fórmula. Esta teoría fué precisada por Kirchhoff.

Fig. 820.

2°. *Campo en un punto.* — Sea un electromotor (ó manantial de electricidad cualquiera), que mantenga los dos cuerpos A y B á los potenciales constantes V_a y V_b, y sea F el campo eléctrico, evidentemente dirigido desde A hacia B que actúa en el punto M del conductor intermedio ab. Si la cantidad $+1$ de electricidad es movida $MM' = \Delta l$, el trabajo producido tiene como expresión

$$\Delta W_1 = F \times \Delta l.$$

Pero $\Delta W_1 = -\Delta V$ (representando ΔV la diferencia de los potenciales en los puntos M' y M); tiénese

$$-\Delta V = F \times \Delta l$$

y por consiguiente

$$F = -\frac{\Delta V}{\Delta l},$$

Si se hace tender á cero Δl, que se toma muy pequeño, el límite del cociente $-\frac{\Delta V}{\Delta l}$, es el campo en el punto M del conductor ab.

3°. *Intensidad de la corriente.* — Admitiendo :

1°. Que la cantidad de electricidad que atraviesa la sección del conductor en M es proporcional al valor del campo en este punto;

2°. Que es proporcional á la sección s del conductor supuesto homogéneo y al tiempo, se tiene para expresar este flujo de electricidad por segundo, la ecuación

$$q = -c.\,s.\left(\frac{\Delta V}{\Delta l}\right).$$

Pero el sistema adquiere un régimen permanente, es decir, para el cual no podría haber acumulación de electricidad entre dos secciones. Este hecho exige evidentemente que entonces q sea constante, y por consiguiente, que la fuerza electromotora en cada punto, es decir $-\frac{\Delta V}{\Delta l}$, sea también constante. El flujo permanente q, que se representa por I es, en estas condiciones, la *intensidad de la corriente.*

4°. *Caída del potencial.* — Decir que el cociente $\frac{\Delta V}{\Delta l}$ es el mismo en todas las regiones del conductor ab es consignar de manera palmaria que es independiente de l, ó en otros términos, que dos segmentos iguales Δl tomados en regiones cualesquiera á lo largo del conductor presentan entre sus secciones extremas una misma diferencia de potencial ΔV.

Pero la variación de potencial relativa á la longitud total $ab = l$ tiene como valor

$$V_a - V_b,$$

luego, la disminución del potencial por unidad de longitud, yendo de a hacia b será

$$\frac{V_a - V_b}{l},$$

de tal manera que el potencial de la sección situada á la distancia x de a será

$$V_x = V_a = \frac{V_a - V_b}{l}.\,x.$$

5°. *Diagrama de la caída del potencial.* — También se puede escribir esta relación

$$\frac{V_a - V_x}{x} = \frac{V_a - V_b}{l}.$$

Pero llevando desde a hacia b (fig. 821) longitudes $V_a = aC$ y $V_b = bD$, trazando la línea CD, y después BD, v_1, X, XE, se tiene, considerando los dos triángulos semejantes XCE, DCB,

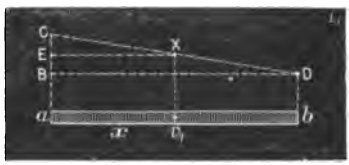


Fig. 821.

$$\frac{CE}{EX} = \frac{CB}{BD}$$

ó

$$\frac{aC - v_1X}{av_1} = \frac{aC - bD}{ab},$$

ó también

$$\frac{V_a - v_1\,X}{x} = \frac{V_a - V_b}{l},$$

luego V_x está representada por la perpendicular v_1 X.

En otros términos, la línea recta CD disfruta de la propiedad de representar, por las perpendiculares bajadas desde sus diferentes puntos al conductor, los potenciales del conductor al pie de las perpendiculares.

6°. *Coeficiente de conductibilidad.* — Como $\frac{\Delta V}{\Delta l}$ tiene el mismo valor que $\frac{V_a - V_b}{l}$.

se puede expresar la intensidad I de la corriente de electricidad por la fórmula

$$I = +cs\frac{V_a - V_b}{l}.$$

El coeficiente c, que depende de la sustancia, mide la *conductibilidad específica* de ésta. Ordinariamente se considera por error el valor inverso

$$\rho = \frac{1}{c}.$$

que ha recibido el nombre de *resistencia específica ;* entonces se tiene

$$I = +\frac{s}{\rho l}(V_a - V_b),$$

que se puede escribir

[1] $$I = \frac{(V_a - V_b)}{\left(\frac{\rho l}{s}\right)},$$

La expresión $\frac{\rho l}{s}$, que se designa por una letra única R, es la *resistencia eléctrica* del conductor *ab*.

7°. *Fórmula de Ohm.* — Observando que

$$\frac{V_a - V_b}{l} = \frac{V_a - V_x}{x} = \frac{V_{x_1} - V_{x_2}}{x_2 - x_1},$$

se ve que I se escribe

$$I = \frac{V_{x_1} - V_{x_2}}{\frac{\rho(x_2 - x_1)}{s}}:$$

$\frac{\rho(x_2 - x_1)}{s}$ es la resistencia de la porción $x_1\ x_2$ únicamente; luego la fórmula [1],

$$R \times I = V_a - V_b,$$

se aplica á una porción cualquiera del conductor.

Esta es la razón de la fecundidad de la ley de Ohm. En la forma resultante demostrada por Pouillet, sería mucho menos útil.

907. **Demostración experimental de la fórmula de Ohm.** — Es fácil comprobar por un método de equilibrio que la distribución de los potenciales está perfectamente acorde con la indicada por la doctrina precedente (fig. 822).

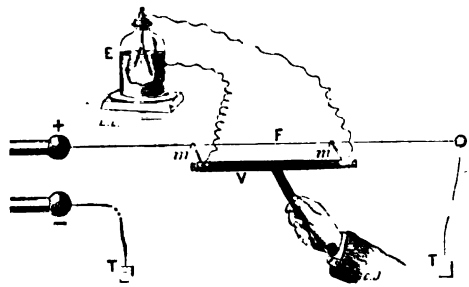


Fig. 822[1].

Pónese la tierra en comunicación con el polo + de una máquina electrostática, — estando su otro polo también en el suelo — por medio de un conductor F que es una cuerda homogénea mojada : después se corren á lo largo del alambre dos contactos *mm*, mantenidos á distancia constante por una barra aisladora V y que comunican respectivamente con la bola y la jaula metálica que rodea el electroscopio y cuya mitad superior se ha suprimido en la figura : obsérvase que este movimiento no hace variar la separación de las hojas de oro.

1. Experiencia del Curso de M. G. Lippmann.

Con las pilas y un electrómetro, por ejemplo el capilar, la demostración es mucho más fácil y absolutamente rigurosa.

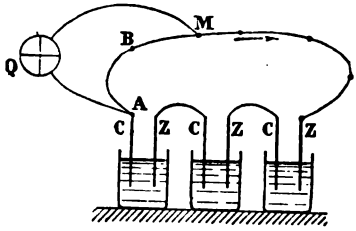


Fig. 823.

Es fácil comprobar por medio de un electrómetro Q (fig. 823), que la diferencia de potencial que existe entre los puntos A y B, A y M, etc., es proporcional á las resistencias AB, AM, etc., á las longitudes AB, AM, etc., pongamos por ejemplo, si el alambre es homogéneo y presenta en todas partes la misma sección.

908. **Fórmula de Pouillet.** — Se acaba de ver que si e es la diferencia de potencial entre dos puntos separados por una resistencia r, se tiene

$$e = rI,$$

siendo I una constante en cualquier sección del circuito. Sentado esto, consideremos el circuito cerrado (fig. 824). Si V es el potencial en M del polo positivo, la ley de Ohm y la de los contactos permite calcular el potencial V' en el polo negativo de dos maneras, sea siguiendo el conductor exterior, sea la cadena interior.

Fig. 824.

Si I es la intensidad de la corriente y R la resistencia del circuito exterior, se tiene

$$V' = V - RI.$$

Interiormente, el potencial disminuye $E = M \mid Z_1 + Z_1 \mid L + L \mid C_1 + C_1 \mid M$ por causa de los contactos cuando se sigue la cadena, y aumenta rI por efecto de la ley de Ohm, siendo r la resistencia de la cadena; luego, observando que E es la magnitud que ha recibido el nombre de fuerza electromotora de la pila en la *teoría del contacto*, resulta

$$[1] \qquad V' = V - E + rI.$$

Igualando los dos valores hallados para V', se tiene

$$V - RI = V - E + rI$$

de donde la fórmula de Pouillet $\quad I = \dfrac{E}{R + r}$.

Observaciones. — 1°. I se expresa en amperes, E en volts, R + en ohms; las unidades están elegidas de tal manera que el cociente de E expresado en volts por R + r expresado en ohms da el valor de I en ampères.

2°. La ecuación [1] indica que en circuito cerrado la diferencia de potenciales V — V' entre los polos de la pila es igual á E — rI : luego, mientras más pequeño es r, menos baja la diferencia de potenciales cuando se cierra el circuito.

909. **Aplicación de las fórmulas de Ohm: Problema de la derivación.** — Sea P una pila cuyos dos polos se reunen por un circuito exterior PAB (fig. 825). Imaginemos que se corta el circuito en uno de sus puntos, y que se reunen los dos extremos separados A y B por medio de dos ó más alambres metálicos de resistencias r, r', r''.

El circuito que comprende la pila y los trozos PA y PB se llama *circuito principal:* sea R su resistencia. Los circuitos añadidos, de resistencias r, r',..., se llaman *derivaciones*.

La corriente de la pila que circula en los diversos circuitos tiene intensidad diferente en cada uno de ellos. La corriente considerada en el circuito principal se llama *corriente principal*; considerada en sus derivaciones, se llama *corriente derivada*.

El problema general de la derivación consiste en hallar las intensidades de la corriente principal I, y de las corrientes derivadas i, i', i'', conociendo la fuerza electromotora E y todas las resistencias R, r', r''... El cálculo es más ó menos largo, según que son más ó menos numerosas las derivaciones.

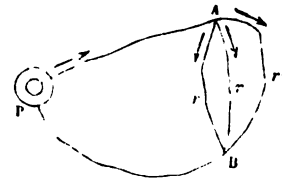


Fig. 825.

Los casos de una derivación, de dos derivaciones, y aun de tres, se resuelven fácilmente por la aplicación directa de la fórmula de Ohm. He aquí algunos ejemplos, que tendrán aplicación en el uso de los instrumentos de medida.

910. **Problema del shunt.** — I. *Entre los puntos* A *y* B *el conductor se desdobla según* AaB *y* AbB; *¿cuál es la relación de las intensidades de las corrientes que se derivan en ambos alambres?*

Siguiendo uno ú otro de los dos alambres, de A hacia B (fig. 826), el potencial debe variar $V_A - V_B$. Si r_1 y r_2 son las resistencias de los dos alambres AaB y AbB, i_1 é i_2 las intensidades de las corrientes que en ellos circulan, se tiene

$$V_A - V_B = i_1 r_1,$$

con

$$V_A - V_B = i_2 r_2;$$

luego

$$i_1 r_1 = i_2 r_2$$

y por consiguiente

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Fig. 826.

II. *¿Cómo se debe elegir la resistencia* r_2 *para que, dada la resistencia* r_1, *no pase á* r_1, *más que la pésima parte de la corriente principal?*

En régimen permanente, no puede haber acumulación de electricidad en un punto del circuito, por ejemplo en A. Luego, si I es la intensidad de la corriente principal, se tiene

$$I = i_1 + i_2 = i_1\left(1 + \frac{i_2}{i_1}\right) = i_1\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right).$$

Como se quiere que $i_1 = \frac{I}{p}$, habrá que elegir r_2 de modo que se tenga

$$I = \frac{I}{p}\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right),$$

es decir tomar

$$\frac{r_1}{r_2} = p - 1.$$

El circuito r_1 recibirá por ejemplo la milésima parte de la corriente principal, si

$$\frac{r_1}{r_2} = 1000 - 1 = 999,$$

es decir si la resistencia r_2 es 999 veces más pequeña que r_1. En estas condiciones se dice que el circuito r_1 está *shuntado* al milésimo.

911. **Problema de los conductores equivalentes.** — *Calcular la resistencia de un conductor* único que sea *equivalente á un haz de alambres derivados* (es decir que pueda reemplazar á éstos sin modificar la intensidad de la corriente principal). — Como en régimen permanente la electricidad no puede acumularse en parte ninguna, se tiene designando por I la intensidad de la corriente principal,

$$[1] \qquad I = i_1 + i_2.$$

Si x es el conductor equivalente al haz AaB, AbB, se tendrá

$$I = \frac{V_A - V_B}{x};$$

y como

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1}, \qquad i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2},$$

la relación [1] da inmediatamente

$$[2] \qquad \frac{1}{x} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}, \quad \text{de donde} \quad x = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Introduciendo las conductibilidades, se ve que la del conductor equivalente es igual á la suma de las conductibilidades de los alambres del haz.

Observación. — Es claro que la fórmula [2] se aplica á un número cualquiera de derivaciones.

Es fácil calcular por otra parte las intensidades I, i_1 é i_2 llamando E á la fuerza electromotora de la pila y R á la resistencia APB.

En efecto, la resistencia del circuito de alambre único sería

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2};$$

luego

$$I = \frac{E}{R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

y por consiguiente

$$i_1 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2} \qquad i_2 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

912. **Problema del puente.** — *Se pregunta dónde deberá colocarse un puente conductor ab entre las dos derivaciones* AaB, AbB (fig. 826), *para que no pase corriente por este tercer alambre.*

Está claro que se necesita y basta que los dos puntos a y b se encuentren en el mismo potencial.

Supongamos el problema resuelto y sean r_1, r_2, r_3, r_4 la resistencia de los cuatro segmentos conductores determinados por los puntos A, B, a y b.

El potencial en a tiene como valor

$$V_A - r_1 i_1 \quad \text{ó también} \quad V_B + r_2 i_1.$$

Análogamente, el potencial en b es

$$V_A - r_3 i_2 \quad \text{ó también} \quad V \quad + r_4 i_2.$$

Por una parte se tiene

$$V_A - r_1 i_1 = V_A - r_3 i_2 \quad \text{ó} \quad r_1 i_1 = r_3 i_2$$

y por otra

$$r_2 i_1 = r_4 i_2 \quad \text{de donde, dividiendo miembro á miembro} \quad \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Tal es la condición buscada.

913. **Ley de Joule y Fenómeno de Peltier. — Potencia de la pila.** — La ley de Ohm, unida á la expresión del trabajo eléctrico, conduce á la consecuencia siguiente. Si e es la diferencia de potencial entre dos puntos é I la intensidad de la corriente, el trabajo liberado en 1 segundo, por la caida de esta cantidad de electricidad entre los dos puntos, es $eI = I^2r$, puesto que $I = \frac{e}{r}$.

La energía puesta en libertad en el elemento de circuito y por unidad de tiempo es pues igual á I^2r.

Como no se la utiliza, aparece en forma de calor. La cantidad de calor equivalente q tiene como valor el cociente de I^2r por el equivalente mecánico de la caloría

$$q = \frac{I^2r}{E}.$$

Esta ley, descubierta por Joule, es fácil de demostrar por medidas eléctricas y calorimétricas.

Por la misma razón, si E' es la diferencia de potenciales en el contacto de dos cuerpos, la corriente suministrará ó absorberá en el contacto la cantidad E'I de energía. Este fenómeno fué descubierto por Peltier.

Si R es la resistencia total del circuito, la energía liberada en 1 segundo tiene como expresión

$$RI^2 \quad \text{ó} \quad EI \text{ puesto que } E = RI;$$

luego se puede decir que la fuerza electromotora es la potencia de la pila cuando cada sección de su circuito es atravesada por la unidad de electricidad en 1 segundo.

La energía EI producida por segundo es la *potencia* P de la pila en las condiciones donde ésta funciona. Se la expresa en watts cuando E é I lo son en volts y en ampères.

El régimen que suministra por segundo el máximum de trabajo útil corresponde á la agrupación que reduce en una mitad la intensidad de la corriente que suministra la pila cerrada únicamente en la resistencia pasiva[1]. Dedúcese que el *máximum de trabajo puesto en disponibilidad en un segundo* por una pila, de fuerza electromotora e y de resistencia interior ρ, sería $\frac{e^2}{4\rho}$.

CAPÍTULO III

MODIFICACIONES DE LA PILA DE VOLTA. — PILAS DE CORRIENTE CONSTANTE

914. **Debilitación y variabilidad de la corriente en las pilas voltaicas.** — La pila de Volta y sus diversas modificaciones descritas anteriormente se llaman *pilas de un solo líquido*. Todas presentan el grave inconveniente de suministrar corrientes de intensidad *variable* y que *disminuye* rápidamente.

La debilitación de la pila de Volta es fácil de explicar examinando las reacciones químicas que origina la clausura del circuito. En efecto, el agua acidulada se descompone, el oxígeno se dirige al zinc donde se forma sulfato de zinc SO^4Z_n, y el hidrógeno va al electrodo de cobre, que en cierto modo queda envuelto por una vaina gaseosa. Estos hechos modifican las diferencias de potencial de los

1 Véase J. Joubert, *Traité élémentaire d'électricité*.

cuerpos en contacto puesto que aparecen otras sustancias nuevas. Compréndese pues que haya modificaciones en la fuerza electromotora primitiva. Esta debilitación se llama *polarización* de la pila.

Por fin, hay otra causa de debilitación enteramente química, común á todos los elementos de pilas de zinc, y que depende de la impureza de este metal. El zinc del comercio, aun en ocasiones el que llaman puro, contiene hierro y otros metales. De ahí resulta que con el agua acidulada se forman en la lámina de zinc gran número de pequeños pares locales entre el zinc y los metales menos atacables; de ahi el gasto rápido del zinc y de los demás elementos del par, que continúa aun cuando no esté cerrado el circuito y no funcione la pila.

915. **Pilas de corriente constante.** — Para obtener una corriente constante, hay que suprimir en el elemento de pila usado estas causas de debilitación y variabilidad de la corriente.

Empiézase por suprimir las corrientes parásitas y secundarias debidas al zinc impuro, empleando eléctrodos de *zinc puro* ó de *zinc amalgamado*, quiere decir aleado con el mercurio en toda su superficie. De la Rive descubrió efectivamente que el *zinc puro* no es atacado por el agua acidulada con ácido sulfúrico, mientras que el del comercio es vivamente atacado y rápidamente destruído. El ataque del zinc puro no se efectúa sino en tanto que se le pone en contacto con otro eléctrodo de cobre ó de platino, igualmente sumergido en agua acidulada : este es el caso de un elemento de pila voltaica. Así, un eléctrodo de zinc puro presentará la doble ventaja de no ser atacado y gastado más que cuando el circuito de la pila está cerrado, y de no dar origen á corrientes locales y secundarias durante el funcionamiento. Más adelante se descubrió que el *zinc amalgamado* tiene la misma propiedad que el puro, y se le usa con preferencia á éste, por causa de la mayor facilidad que hay para procurárselo.

Después se ha logrado suprimir, ó atenuarlas considerablemente, las corrientes de polarización introduciendo en el elemento de pila sustancias accesorias capaces de destruir los productos secundarios que causan la polarización. Estas sustancias auxiliares se llaman *cuerpos despolarizantes* ó simplemente *despolarizantes.*

Las pilas en que se han suprimido las dos causas principales de debilitación de la corriente se llaman *pilas de corriente constante.*

El despolarizante es la mayor parte de las veces un líquido. Por esto se llama también á las mencionadas pilas con muchísima frecuencia *pilas de dos líquidos.* Igualmente reciben el nombre de *pilas de tabiques*, porque en general los dos líquidos están separados en cada elemento por medio de un tabique ó *pared porosa.*

El despolarizante usado puede ser también una *sustancia sólida.* Entonces la pila es *de corriente constante* y *de un solo líquido.*

Es posible dividir en consecuencia las pilas hidro-eléctricas en dos grandes categorías:

1°. Las *pilas de un solo líquido*, con ó sin *despolarizante sólido;*

2°. Las *pilas de dos líquidos*, uno de los cuales hace papel de despolarizante[1].

El tipo de las pilas de un solo líquido, *sin despolarizante*, es la *pila de Volta*. El tipo de las pilas de un solo líquido con despolarizante es la *pila Leclanché*. El de dos líquidos, siendo *despolarizante* uno de ellos es la *pila de Daniell;* ésta es con mucho *la más constante* de todas las *pilas comunes de despolarizante.*

916. **Pila de Becquerel.** — El *elemento Becquerel* es el más antiguo de los pares de dos líquidos. Lo inventó en realidad el físico francés Becquerel, quien ya en 1829 indicó su principio; pero quien le dió forma práctica siete años más tarde fué el físico inglés Daniell, cuyo nombre conserva injustamente.

Es un elemento Volta (zinc-cobre-agua acidulada), al cual se agrega, como *despolarizante*, una solución concentrada de *sulfato de cobre.*

Descripción. — El polo negativo es una ancha lámina de zinc amalgamado Z, redondeada en forma de cilindro, cortada á lo largo de una de sus generatrices; encuéntrase sumergido sea en el agua acidulada con ácido sulfúrico, sea en el agua salada, sea en una solución de sulfato de zinc: este primer líquido se encuentra contenido en un primer vaso, de vidrio ó de loza (fig. 827).

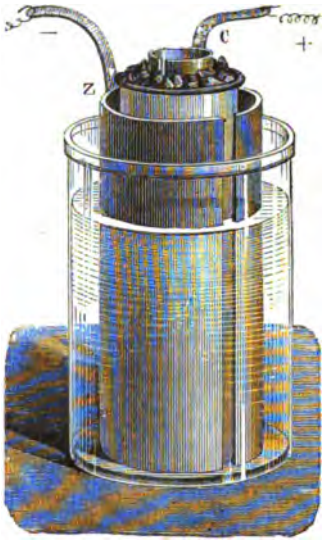


Fig. 827.

El polo positivo C está constituído por un cilindro de cobre, que se baña en una solución concentrada de sulfato de cobre, contenido en un vaso de tierra porosa ó de porcelana este segundo vaso se encuentra dentro del primero.

Función química del despolarizante. — El sulfato de cobre es descompuesto por el hidrógeno, en cobre y ácido sulfúrico, según la fórmula

$$SO^4Cu + H = Cu + SO^4,H.$$

El cobre reducido se deposita sobre el polo cobre C, donde forma una capa sin adherencia; el ácido sulfúrico, puesto en libertad, se difunde, á través del tabique poroso, en el agua acidulada que baña el polo zinc, y mantiene su acidez.

1. Véase R. Colson, *Traité élémentaire d'électricité.*

Esta pila suministra una corriente muy constante, sobre todo si se tiene cuidado de mantener saturada la solución de sulfato de cobre, colocando en la parte superior del vaso poroso cristales de sal que van disolviéndose á medida que se empobrece el líquido. Pero tiene el inconveniente de gastarse con *circuito abierto*, sobre todo cuando el zinc está en contacto con agua acidulada ó salada.

Constantes del elemento Becquerel. — La fuerza electromotora E es sensiblemente igual á 1 volt.

La resistencia interior R es variable según la superficie de los eléctrodos, la estructura de los vasos porosos y la composición ó la concentración de los líquidos. Varía de 1/5 de ohm á varios ohms en los modelos usuales.

917. **Modificaciones del elemento Becquerel.** — El elemento Becquerel ha sido objeto de gran número de modificaciones. La más importante es la supresión del vaso poroso; la separación del despolarizante y del líquido ácido se obtiene entonces únicamente mediante la diferencia de sus densidades. Tal es el *elemento Callaud*, muy empleado en los servicios telegráficos.

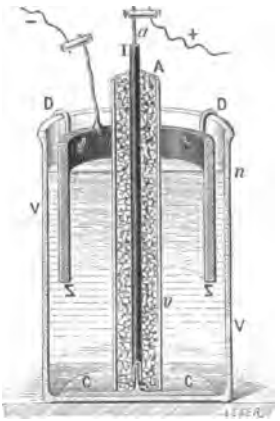


Fig. 828.

1°. *Elemento Callaud.* — Este elemento está contenido en un vaso único V de vidrio ó de loza (fig. 828). En él se encuentra una placa de cobre C á que se suelda un alambre de cobre A, aislado del resto de la pila por un barniz de gutapercha I. Por encima de la placa, y en un cilindro de vidrio *v*, hay una columna de cristales de sulfato de cobre; en el líquido se encuentra sumergido por entero un cilindro de zinc Z, análogo á los de los elementos Becquerel; pero de una altura dos veces menor, y suspendido por garfios D que descansan en el borde del vaso. La parte inferior del líquido se satura de sulfato de cobre, mientras que la superior está constituída por una disolución de sulfato de zinc: los dos líquidos se mantienen separados gracias á la diferencia de sus densidades. La despolarización se efectúa como en la pila de Daniell.

La pila de Callaud es no sólo de fácil manejo sino que además procura notable economía de sulfato de cobre, y suministra corrientes constantes durante meses, sin necesitar más cuidados que el añadir un poco de agua para reemplazar la que se pierde por evaporación; 60 pares bastan para hacer funcionar los aparatos telegráficos entre Tours y Burdeos sin paradas.

918. **Pila de Bunsen.** — El elemento de la *pila de Bunsen*, ó *pila de carbón*, inventada en 1843, está caracterizado por un despolarizante líquido que es el *ácido nítrico*, y por su eléctrodo positivo que es una placa ó un cilindro de un carbón especial[1].

1. Este carbón se prepara calcinando, en un molde de palastro, una mezcla íntima de coke y de hulla grasa, bien pulverizada y comprimida. Ó bien es carbón de retorta primero pulverizado y aglomerado luego: estas dos especies de carbón son buenos conductores.

Cada elemento se compone de cuatro piezas que pueden colocarse unas en otras: 1°. un vaso F (fig. 829) de greda ó vidrio, que se llena con una disolución al décimo de ácido sulfúrico; 2°. un cilindro hueco Z, de zinc *amalgamado;* 3°. un vaso poroso V, de tierra de pipa poco cocida, donde se pone ácido nítrico ordinario; 4°. una placa de

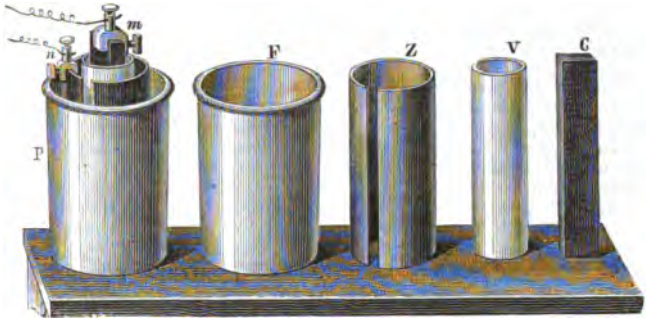


Fig. 829.

carbón C. En el vaso F se dispone primero el zinc, luego el vaso poroso, y en el centro el carbón. En este último se adapta una pinza de cobre *m* que tiene un tope con un alambre de cobre, que es el reóforo positivo; en el zinc se adapta una segunda pinza *n* con un alambre que es el reóforo negativo.

La pila permanece inactiva mientras no se establece la comunicación entre el carbón y el zinc por medio de un conductor; pero así que esto ocurre, empieza la acción química. El agua acidulada es descompuesta por el zinc, con formación de sulfato de zinc y reducción del despolarizante por el hidrógeno desprendido, según la fórmula

$$NO^5, HO + H = NO^4 + 2\,HO.$$

Esta reacción viene acompañada entonces de un desprendimiento de vapores nitrosos (NO^4) que constituye un inconveniente serio de la pila de Bunsen, así que ésta se encuentra formada por gran número de elementos.

La fuerza electromotora del elemento Bunsen es de 1,8 volt próximamente.

Observación. — *Elemento de Grove.* — Antes que Bunsen ideó Grove un elemento con el mismo despolarizante, pero distinto del anterior por un eléctrodo positivo, que era de *platino.*

919. **Elemento Marié-Davy.** — Este es un elemento análogo al de Bunsen; pero cuyo despolarizante consiste en una pasta de sulfato de protóxido de mercurio, comprimida alrededor del carbón.

La reacción despolarizante se expresa por la fórmula

$$Hg^2\,O,S\,O^3 + H = 2\,Hg + HO,S\,O^3$$

La fuerza electromotora E = 1,2 volt

920. **Pila de bicromato y de dos líquidos.** — El elemento de esta pila no se distingue del Bunsen sino en que el ácido nítrico del vaso poroso es reemplazado por una solución de 3 kg. de bicromato de sosa en 4 litros de agua ordinaria. La mezcla líquida se efectúa en un vaso de greda ó de porcelana, y después se vierten poco á poco, agitando con una varita de vidrio, 10 litros de ácido sulfúrico á 66° Baumé.

En cada vaso de greda ó vidrio se coloca con la solución bicromatada un carbón provisto de su pinza, y parafinado en la parte superior; después se pone el zinc en el vaso poroso con una solución de 80 á 100 gramos de sal marina.

Esta pila presenta la gran ventaja de no difundir vapores de ácido hiponítrico; pero se polariza con mucha rapidez por efecto de un depósito de óxido de cromo sobre el zinc. La fuerza electromotora inicial es de 1,8 á 2 volts, como la del elemento de un solo líquido; pero la resistencia interior es más fuerte, por causa de la interposición del vaso poroso.

921. **Pilas de un solo líquido con despolarizante líquido. — Pila de bicromato.** — Las pilas de un solo líquido que están provistas de un despolarizante líquido, entran en la categoría de las pilas de corriente constante. Este *despolarizante* es siempre un bicromato de potasa ó de sosa, ó bien ácido crómico en disolución. Los diferentes modelos de estos elementos no se diferencian sino en las proporciones del bicromato que entra en la composición del líquido. El tipo de ellos es la pila llamada de *bicromato de potasa.*

Pila de bicromato (*de un solo líquido*). — El líquido único consiste en una disolución de bicromato de potasa añadida con ácido sulfúrico. No hay más que un vaso exterior de vidrio, que contiene el líquido, y nada de vaso poroso. El polo positivo está constituído por dos placas de carbón de retorta, fijas paralelamente en un disco de caucho endurecido. Entre esas dos placas puede colocarse una lámina de zinc *amalgamado*, de la mitad de longitud próximamente, mediante un vástago de corredera: ese es el *polo negativo*. El elemento no funciona más que cuando se desliza el zinc en su corredera, de modo que penetre dentro del líquido (fig. 830). Cuando el circuito está cerrado se produce un sulfato doble de cromo y de potasa con desprendimiento de oxígeno. Este oxígeno es el que suprime la polarización de los eléctrodos, quemando el hidrógeno desprendido. Así es que esta pila, aunque de un solo líquido, no se polariza sino con mucha lentitud.

Fig. 830.

Constantes. — La fuerza electromotora E varía de 1,8 á 2 volts. La resistencia interior R es tanto más *pequeña* cuanto *mayor* es la proporción de ácido sulfúrico: en general es de *algunos centésimos de ohm.*

922 **Pila de un solo líquido, con despolarizante sólido. — Pila de Leclanché.** — Los elementos de corriente constante que entran á

formar parte de esta categoría son los de Leclanché, de Lalande y Chaperon, etc. Describiremos como tipo el *elemento Leclanché*.

Elemento Leclanché. — El polo positivo es una placa de carbón, coronada por una especie de cabeza de plomo, que está sumida en el despolarizante. El polo negativo está constituído por un vástago de zinc sumergido en una disolución de clorhidrato de amoniaco. El *despolarizante sólido* está constituído por una mezcla de peróxido de manganeso y de carbón de retorta en granos gruesos. Cuando se cierra el circuito, el zinc es atacado por el clorhidrato, y se forma cloruro de zinc que es soluble; cuanto al hidrógeno desprendido se dirige al peróxido, y lo vuelve al estado de sesquióxido formando agua.

En el primer modelo de este elemento, un vaso poroso contenía la mezcla despolarizante con el carbón; el clorhidrato estaba contenido con el zinc en un vaso exterior de vidrio.

En un modelo más reciente (fig. 831), se ha suprimido el vaso poroso, solidificándose por presión la mezcla despolarizante y pegando á ella la lámina de carbón. Cuanto al vástago de zinc, se aplica contra

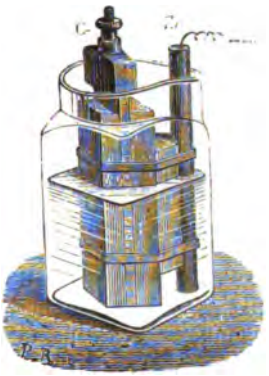


Fig. 831.

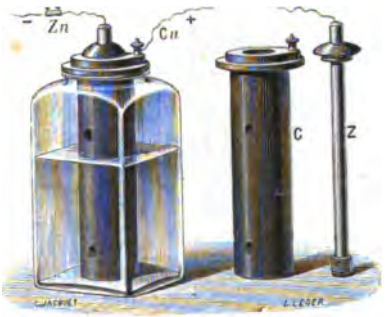


Fig. 832.

la masa por medio de bandas de caucho, y es aislado por la interposición de una placa de madera.

Modelo Leclanché-Barbier. — En el último modelo (fig. 832), el zinc Z está mantenido en la línea eje del frasco. Concéntricamente está un cilindro hueco C, formado por la aglomeración de grafito y de bióxido de manganeso pulverizados; estas materias se mezclan con sebo y un poco de azufre, dándoles luego en moldes la forma requerida por presión, después de lo cual se las calienta hasta 350°. El producto obtenido es poroso, de manera que el hidrógeno desprendido puede penetrar hasta el bióxido de manganeso.

Constantes del elemento Leclanché. — Este elemento presenta la ventaja de no *trabajar* más que en circuito cerrado. Así es que puede

funcionar sin interrupción durante varios meses, siendo muy cómodo su empleo. Las constantes son :

Fuerza electromotora		1,48 volt
Resistencia interior	1° elemento de vaso poroso. .	de 4 á 8 ohm
	2° elemento de aglomerados.	de 0,9 á 1,8 ohm

923. **Pilas tipos.** — Ciertas pilas se emplean como tipos, por causa de su constancia, en la comparación de las fuerzas electromotoras. Citaremos las principales;

1°. *Tipo Daniell-Fleming.* — Compónese (fig. 833) de un tubo en forma de U, una de cuyas ramas contiene un cilindro de zinc puro Z, que penetra en una disolución de sulfato de zinc (densidad = 1,400), que llega hasta por debajo del nivel del conducto R'''. Un vástago C cubierto de cobre por electrolisis, penetra en una disolución de sulfato de cobre (densidad = 1,100). Esta columna de sulfato va desde R''' hasta C. La llave inferior R'' sirve para vaciar la pila. Abriendo la llave es fácil llenar la pila con el sulfato de zinc contenido en el vaso A. Puesto el zinc en su lugar, ábrense las llaves R'' y R'; entonces el sulfato de cobre llena la rama de la derecha. La salida se arregla de modo que la superficie de separación de las dos disoluciones esté en R'''.

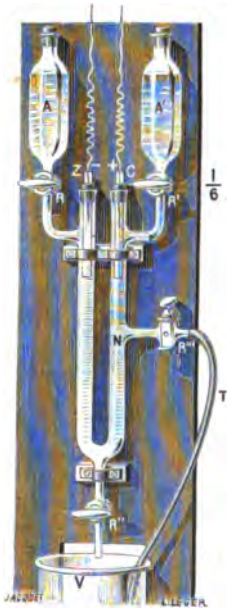


Fig. 833.

La fuerza electromotora de este tipo es de 1,072 volt.

2°. *Tipo Gouy.* — Este elemento es fácil de preparar. Tómase un frasco pequeño de dos golletes, en cuyo fondo se echa mercurio (fig. 834). Un alambre de platino aislado en un tubo de termómetro, va á sumergirse en el mercurio por su extremo y sale del frasco por el gollete lateral. Después de haber introducido en el frasco una capa conveniente de óxido de mercurio precipitado y una disolución de sulfato de zinc, de densidad 1,06, se fija en el gollete central un tubo de ensayo, taladrado por un pequeño agujero *o* y que contiene un lápiz de zinc amalgamado.

La fuerza electromotora es de 1,389 volt á 17°.

3°. *Tipo Latimer-Clark.* — He aquí cómo se construye este elemento (fig. 835). Dos tubos de ensayo, que tienen en su parte inferior presas de contacto de mercurio, comunican por un tubo transversal. En la parte inferior de uno de los tubos laterales se introduce una amalgama de zinc y en la otra mercurio puro cubierto de sul-

fato mercurioso. Después se agrega una disolución saturada de sulfato de zinc y cristales de esta misma sustancia para evitar la sobresaturación, hasta por encima del tubo transversal.

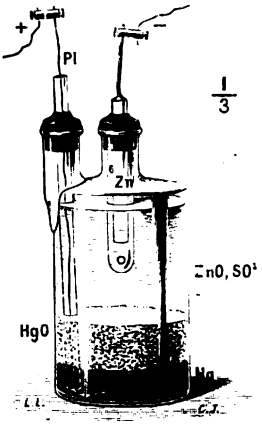


Fig. 834.

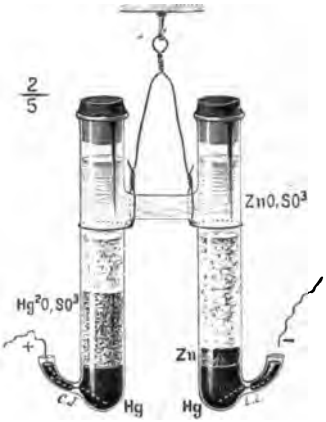


Fig. 835.

La fuerza electromotora del Latimer es de 1,438 volts á 15°.

Observación. — Todos estos tipos están cerrados herméticamente y parafinados. Se tiene cuidado de ennegrecerlos exteriormente para preservarlos de la acción de la luz.

CAPÍTULO IV

DIVERSOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES CONTINUAS: EFECTOS FISIOLÓGICOS. — EFECTOS QUÍMICOS Y ELECTROLISIS.

EFECTOS FISIOLÓGICOS.

924. **Acciones sobre los nervios y los músculos.** — Los efectos fisiológicos de las corrientes fueron los primeros que se observaron, puesto que á ellos se debe el descubrimiento de la electricidad dinámica por Galvani. Consisten en *conmociones* y *contracciones musculares*.

1°. Cogiendo con las manos los reóforos de una pila, se siente conmoción más ó menos violenta, comparable á la botella de Leyden, sobre todo si se han humedecido las manos con agua acidulada ó salada, cosa que aumenta la conductibilidad. La conmoción es

más intensa en el momento en que se suelta uno de los reóforos. Con una pila de Bunsen de 50 á 60 pares de pequeño tamaño, la conmoción es fuerte; con 150 á 200 pares es dolorosa y aun peligrosa. Se la siente en los brazos más lejos que la causada por la botella de Leyden y transmitiéndola á través de una cadena formada por varias personas sólo la experimentan las más cercanas á los polos.

2°. Los efectos fisiológicos de las corrientes no son los mismos en los nervios sensitivos, en los nervios motores y en los músculos. Si la corriente actúa únicamente sobre los primeros, hay dolor; en los segundos, conmoción; los músculos se contraen, pero entonces se necesita una corriente de mayor tensión.

3°. Dichos efectos no se dejan sentir sino al cerrarse y abrirse la corriente, y cesan así que ésta circula. Sin embargo, con corrientes muy enérgicas persisten las conmociones y las sensaciones; sólo que son mucho más débiles que al cerrarse y al abrirse el circuito.

4°. Por fin, los efectos de las corrientes sobre los nervios varían según que se propaguen en el sentido de las ramificaciones nerviosas ó en el contrario.

Observación. — Por lo demás, la cuestión de los efectos de la electricidad sobre los organismos vivos es todavía según nuestro parecer tan oscura en sus orígenes y en sus aplicaciones, que consideramos prudente concretarnos á estas generalidades.

EFECTOS QUÍMICOS. — LEYES DE LA ELECTROLISIS.

925. **Experiencia fundamental: descomposición del agua en el voltámetro.** — El primer efecto químico observado fué la descomposición del agua, efectuada en 1800 por Carlisle y Nicholson por medio de una pila de columnas. El agua debe contener en disolución una sal, un ácido ó una base que aumente su conductibilidad; en el caso contrario es muy lenta la descomposición, porque como el agua pura es muy poco conductora, no pasa por ella sino corriente muy débil. El aparato usado para esta experiencia se llama *voltámetro*. Compónese de un vaso de vidrio, pegado con mástic en una peana de madera (fig. 836). El fondo del vaso está atravesado por dos alambres de platino *h* y *n*, aislados uno de otro y respectivamente atados en dos topes de cobre, fijos á ambos lados del aparato, y por donde se esta-

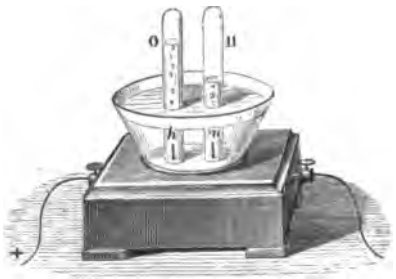


Fig. 836.

blece la comunicación con los polos de la pila. Después de llenar el vaso con agua que se ha hecho conductora, se colocan sobre los alambres de platino dos campanas llenas del mismo líquido, y después se establece la corriente. En seguida se descompone el agua en oxígeno y en hidrógeno que van á parar á las campanas. Entonces se demuestra que la campana positiva se llena de oxígeno y la negativa de hidrógeno; obsérvase que el volumen de este último gas es doble del primero. Esta experiencia realiza pues al mismo tiempo el análisis cualitativo y el cuantitativo del agua.

Observación. — *Definiciones.* — Las sustancias que son descompuestas por la corriente, como el agua, recibieron de Faraday el nombre de *electrolitos;* el mismo físico llamó *electrolización* ó *electrolisis* al hecho mismo de la descomposición por la corriente. Por fin, las superficies metálicas que establecen la comunicación entre la sustancia electrolizada ó *electrolito* y el circuito general de la pila se denominan *eléctrodos.* La que conduce la corriente es el *anodo*; y el eléctrodo de salida es el *catodo.*

926. **Leyes experimentales de la electrolisis.** — 1°. Si se coloca una serie de voltámetros unos después de otros, *V*, *V'*, *V''*, y se hace que los atraviese la misma corriente (fig. 837), se observa que el peso

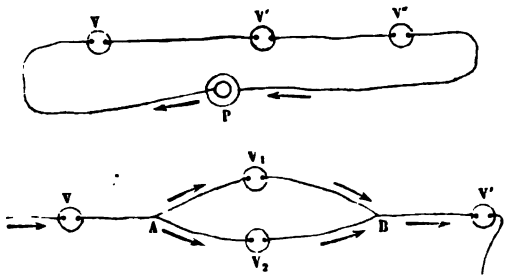


Fig. 837 y 838.

de hidrógeno recogido en uno de ellos es idéntico en el mismo tiempo, sean cuales fueren en los diferentes aparatos, la materia y la distancia de los eléctrodos, la proporción y la naturaleza del ácido ó de la base. Este hecho se expresa diciendo que:

La intensidad electroquímica de la corriente es la misma en todos los puntos del circuito exterior de la pila.

2°. Daniell observó igualmente que la cantidad de gas recogida en lo interior de un elemento es la misma que en los voltámetros exteriores. De donde se deduce que:

La intensidad electroquímica de la corriente en lo interior de la pila es la misma que en lo exterior.

3°. Por fin, si el reóforo que parte del polo positivo de la pila se bifurca en dos alambres que se dirigen separadamente á dos voltá-

metros idénticos V_1 y V_2 reuniéndose después en un alambre único que va á parar al polo negativo de la pila (fig. 838), se recogen en cada voltámetro cantidades de hidrógeno iguales entre sí; además cada una es exactamente la mitad, en tiempos iguales, del gas obtenido cuando la corriente entera pasa por uno solo de los dos voltámetros. Según la idea que nos formamos de una corriente eléctrica, es evidente a priori que la cantidad de electricidad que pasa en un segundo por uno ú otro de los voltámetros es la mitad de la cantidad que pasa en un segundo por el circuito principal. Se puede expresar en consecuencia el hecho precedente diciendo que :

El peso del agua descompuesta ó del hidrógeno emitido en un tiempo dado, es proporcional á la cantidad de electricidad que pasa por el voltá metro.

Observación. — 1°. Todas estas leyes se demuestran igualmente con electrolitos distintos del agua, como por ejemplo con sales en disolución ó en fusión.

2°. Es inútil obligarse á establecer dos derivaciones idénticas. Basta observar en efecto que la *suma* de los volúmenes de hidrógeno desprendidos en las derivaciones es igual al que se produce en un voltámetro colocado antes ó después de éstas.

927. **Electrolisis de los compuestos binarios.** — Las corrientes ejercen sobre todos los compuestos binarios *conductores* la misma acción que en el agua.

Óxidos metálicos. — Todos son reducidos : el oxígeno se desprende en el eléctrodo positivo y el metal se deposita en el eléctrodo negativo.

Electrolización de la potasa. — Davy fué quien primero la realizó, sometiendo un pedazo de potasa húmeda á la corriente de 250 pares voltaicos. En el eléctrodo positivo se desprende el oxígeno, en el negativo un metal nuevo, que era el potasio. De la misma manera obtuvo el sodio. Pero estos metales ardían en el aire á medida que iban quedando en libertad, por causa de su gran afinidad con el oxígeno.

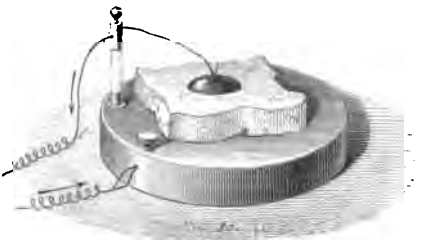


Fig. 839.

No es posible prepararlos por este método más que empleando la disposición que adoptó Seebeck. Practícase en un fragmento de potasa una cavidad que se llena de mercurio ; después se coloca la potasa sobre una placa metálica por medio de la cual se la hace comunicar con el polo positivo de una pila potente (fig. 839), mientras que la comunicación del mercurio se establece con el polo negativo.

Entonces el potasio se dirige hacia el mercurio y se amalgama con él sin arder. Destilando después esta amalgama en aceite de nafta, se tiene como residuo el potasio. De la misma manera se procede con la sosa.

Oxácidos. — Se descomponen lo mismo que los óxidos, y siempre el oxígeno se dirige al eléctrodo positivo y el radical al negativo.

Hidrácidos. — También son descompuestos, pero su radical se dirige al eléctrodo positivo y el hidrógeno al negativo.

Sales haloides. — Los compuestos binarios metálicos, tales como los cloruros, los yoduros, los bromuros, se descomponen de la misma manera : el metal se deposita en el eléctrodo negativo, y el cloro, el yodo, el bromo en el eléctrodo positivo. Como la mayor parte de estos compuestos son poco conductores en el estado sólido, se les disuelve ó se les funde para someterlos á la electrolisis.

Observaciones. — 1°. Los compuestos binarios no metálicos, como el sulfuro de carbono, el cloruro de azufre no son bastante conductores para transmitir la corriente y no pueden por consiguiente ser electrolizados sino en mezcla.

2°. En ninguno de estos experimentos se observan señales de descomposición en el intervalo de los dos eléctrodos : donde la separación de los elementos del cuerpo tratado se manifiesta es en el contacto mismo de los eléctrodos.

928. **Electrolisis de las sales.** — Todos los compuestos ternarios en disolución son descompuestos por la pila, con tal de ser conductores de la corriente. La descomposición se efectúa siempre con arreglo á esta ley.

El metal de la sal se deposita en el eléctrodo negativo, mientras que el ácido y el oxígeno del óxido se desprenden en el eléctrodo positivo.

Por ejemplo, con el sulfato de cobre se tiene

$$SO^4, Cu + HO = SO^4 + Cu + HO,$$

y con el sulfato de potasa

$$SO^4, K + HO = SO^4 + K + HO.$$

929. **Leyes de Faraday.** — Las cantidades de los electrolitos descompuestos en condiciones dadas, se determinan por la ley siguiente, que descubrió Faraday.

Cuando una misma corriente actúa simultáneamente sobre una serie de electrolitos, los pesos de estos cuerpos descompuestos en un mismo tiempo están generalmente en la misma relación que sus equivalentes químicos.

Consecuencias. — 1°. Si se coloca en el circuito un voltámetro de agua y si se prolonga suficientemente la experiencia para descomponer un equivalente de este líquido, *en el mismo tiempo se descompondrá un equivalente de cada uno de los electrolitos.* Si se llama *equi-*

valente eléctrico á la cantidad de electricidad que descompone un equivalente de agua, se puede enunciar esta otra ley : *Sea cual fuere el electrolito que atraviesa el equivalente eléctrico descompone siempre un equivalente de aquél.*

2°. Por fin, siendo la intensidad de la corriente la misma en todas las partes del circuito, fuera y dentro de la pila, la ley de Faraday no se aplica soló á las soluciones interpuestas en el circuito exterior, sino á cada uno de los pares de la pila. De ahí esta tercera ley : *Por cada equivalente de electricidad enviado al circuito de la pila, se disuelve en cada uno de los pares de la pila en serie un equivalente de zinc.*

3°. La ley fundamental de la electrolisis puede enunciarse de la manera siguiente en el punto de vista cuantitativo :

Un coulomb deposita siempre una fracción del equivalente en peso del electrolito que atraviesa igual á $\frac{1}{96600}$ ó 0,000 010 35 (El equivalente se expresa en gramos y es referido al del hidrógeno que se toma por unidad.)

Observaciones. — 1°. En general, como el peso del depósito metálico sobre un eléctrodo de superficie S es de m gramos por segundo, el depósito por unidad de superficie por segundo es $\mu = \frac{m}{S}$. Depende de la densidad de la corriente $\frac{I}{S}$, es decir de la relación que existe entre la intensidad de la corriente y la superficie del eléctrodo.

2°. En el caso de los compuestos superiores hay que tomar como equivalentes los que corresponden á fórmulas semejantes á las de los protocloruros, de los protóxidos, etc.; por ejemplo, se escribirá $Cu^2\,Cl$, $Fe\frac{2}{3}Cl$, $Su\frac{1}{2}Cl$, $Fe\frac{2}{3}$, SO^4, etc. Así, la cantidad de electricidad que pone en libertad Fe en el sulfato de protóxido de hierro $Fe\,SO^4$, libera $Fe\frac{2}{3}$ en el sulfato de sesquióxido $Fe\frac{2}{3}SO^4$.

930. Trabajo absorbido por la electrolisis. — Fuerza electromotora de polarización. — Cuando se cierra sobre sí mismo un voltámetro por el cual se hace pasar una corriente, la experiencia prueba que origina otra corriente de sentido contrario á la que ha producido la electrolisis.

Su energía se deriva de la recomposición de los elementos anteriormente separados. Sea e la fuerza electromotora que produce esta corriente y que se llama *fuerza electromotora de polarización* del voltámetro; existe durante toda la electrolisis, tanto que la energía eléctrica absorbida por segundo en la operación y para una corriente de intensidad I tiene como expresión el producto eI .

Si por otra parte, la cantidad de calor que acompaña la formación de un equivalente del electrolito considerado es igual á q calorías, la descomposición de $\frac{1}{96600}$ de equivalente exigirá un gasto de energía igual á

$$\frac{Eq}{96600}$$

(Siendo E el equivalente mecánico de la caloría).

Como I coulombs descomponen por segundo $\frac{I}{96600}$ equivalentes, la corriente deberá suministrar al voltámetro $\frac{EIq}{96600}$ unidades de energía.

Pero la corriente suministra la energía eI al voltámetro en el mismo tiempo; tiénese pues

$$eI = \frac{Eq}{96\,600},$$

de donde

$$e = \frac{Eq}{96.600}.$$

El principio de la conservación de la energía conduce de este modo á un método de cálculo de la fuerza electromotora de polarización; esta magnitud representa evidentemente también *la fuerza electromotora mínimum* de que habrá que disponer *para determinar la electrolisis.*

La constante $\frac{E}{96\,600}$, que se introduce en este cálculo, tiene como valor 0,0000432 en el sistema C. G. S.; luego $e = 0{,}0000432\,q$.

Observaciones. — 1°. *Fuerza electromotora mínimum de electrolisis del agua.* — Si se trata del agua, como $q = 34500$, se tiene $e = 1{,}49$ volt. Luego nunca se podrá descomponer agua si el electromotor de que se dispone tiene fuerza electromotora inferior á 1,40 volt.

2°. *Cálculo de la fuerza electromotora de una pila.* — Tomemos por ejemplo la pila Becquerel. En un elemento, el exceso del calor de formación del sulfato de cobre descompuesto sobre el del sulfato de zinc formado suministra la energía eléctrica. Pero la termoquímica asigna á q el valor 25300, de donde $e = 1{,}093$.

931. **Efectos secundarios de la electrolisis.** — En la electrolisis de las soluciones salinas se producen con frecuencia reacciones accesorias que no tienen nada de eléctrico y que pueden velar la reacción principal. Desígnaseles por el nombre de *efectos secundarios :* he aquí algunos ejemplos.

1°. En las sales de base de potasa ó de sosa, el metal que se deposita en el eléctrodo negativo descompone el agua apoderándose de su oxígeno y aparece en estado de óxido al mismo tiempo que en ese eléctrodo se desprende hidrógeno y oxígeno en el positivo. Este es un efecto secundario puesto que no se produce sino después de la descomposición de la sal.

2°. Con las sales cuyo óxido puede adquirir grado más alto de oxidación, como son las de protóxido de hierro, el oxígeno puesto en libertad en el polo positivo sobreoxida la base de la sal, y ésta pasa al estado de sal de peróxido.

3°. En una solución de una sal de cobre, si el eléctrodo positivo es también de cobre, el oxígeno que ahí se desprende la ataca formando óxido de cobre, luego este último, combinándose con el ácido sulfúrico que se dirige al mismo eléctrodo, reproduce una cantidad de sulfato precisamente igual á la que ha sido descompuesta. El primer efecto es la descomposición del sulfato de cobre, y el segundo la reproducción de una cantidad igual de la misma sal. Pronto se verá la aplicación de este efecto secundario en la galvanoplastia, el dorado y el plateado.

932. **Teoría de Grotthuss.** — Grotthuss ha explicado las descomposiciones electroquímicas del modo siguiente : primero admitió que en todo compuesto uno de los elementos es electropositivo y electronegativo el otro. Después supuso que bajo la acción de las electricidades contrarias de los eléctrodos, se producen en

el líquido donde aquéllas penetran una serie de descomposiones y recomposiciones sucesivas de un eléctrodo al otro, de tal manera que únicamente los elementos de las moléculas extremas, que no se recomponen, son los que quedan libres y se dirigen á los polos. Por ejemplo, como el agua está formada de 1 átomo de oxígeno y de dos de hidrógeno, y como el primer gas es electronegativo siendo electropositivo el segundo, cuando el líquido es atravesado por una corriente suficientemente enérgica, la molécula *a*, que está en contacto con el polo positivo, se *polariza*, es decir que el oxígeno, que es electronegativo, se ve atraído, mientras que el hidrógeno, electropositivo, es rechazado (fig. 840). El oxígeno de esta molécula se dirige entonces al eléctrodo positivo, y el hidrógeno libre se une inmediatamente con el oxígeno de la molécula *b*, después el hidrógeno de ésta con el oxígeno de la molécula *c* y así sucesivamente hasta el polo negativo, donde los últimos átomos de hidrógeno quedan libres y se desprenden.

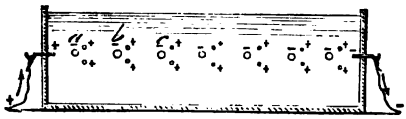


Fig. 840.

La misma explicación se aplica á la descomposición de los óxidos metálicos, de los ácidos y de las sales, en una palabra, á todas las descomposiciones electrolíticas. Por esto es por lo que no se ven aparecer los elementos de la electrolisis más que en los eléctrodos mismos y nunca en el intervalo.

CAPÍTULO V

EFECTOS MECÁNICOS DE LAS CORRIENTES. — ELECTRODINÁMICA.

933. **Efectos mecánicos de las corrientes. — Acciones mutuas entre las corrientes eléctricas.** — En el flujo eléctrico que constituye las corrientes, hay á veces transporte de materia ponderable en el sentido de su dirección. Así, en el arco voltaico que más adelante estudiaremos, se observa un transporte de partículas de carbón del polo positivo al negativo : este es un efecto mecánico de las corrientes. Hay otros mucho más importantes : son los *movimientos* que producen á distancia, sea sobre los imanes móviles, sea sobre conductores móviles recorridos también por corrientes.

Los efectos mecánicos más sencillos son las acciones mutuas que se ejercen entre conductores metálicos recorridos por corrientes. Estos fenómenos, cuyo descubrimiento se debe á Ampère, constituyen una rama de la electricidad dinámica llamada *electrodinámica*. Los efectos son distintos según la dirección de las corrientes que se encuentran en presencia y sus posiciones relativas. Pueden ser agrupados en tres categorías : los de *cambio de posición*, de *orientación* y de *rotación*.

CAMBIOS DE POSICIÓN DE LAS CORRIENTES POR ACCIÓN DE LAS CORRIENTES.

934. **Leyes de las corrientes paralelas.** — 1°. *Dos corrientes paralelas del mismo sentido se atraen.*

2°. *Dos corrientes paralelas de sentidos contrarios se rechazan.*

Estas leyes se demuestran experimentalmente por medio de un aparato que se debe á Ampère, que Pouillet modificó posteriormente y finalmente por Obellianne.

Descripción del aparato. — Compónese de dos columnas de latón A y D, entre las cuales hay una más pequeña *c*. La columna D mantiene un marco de madera M, llamado *multiplicador* (fig 841) que se puede fijar á diferentes alturas por medio de un tornillo de presión y en el cual se ha arrollado 20 veces el alambre conductor de la corriente, lo cual aumenta mucho su acción. Este multiplicador está mantenido por dos articulaciones que permiten, una invertirlo sobre sí mismo (fig. 842), la otra colocarlo horizontalmente (fig. 844). La columna pequeña es hueca, y en su interior se desliza un tubo de latón terminado por una cápsula *c*,

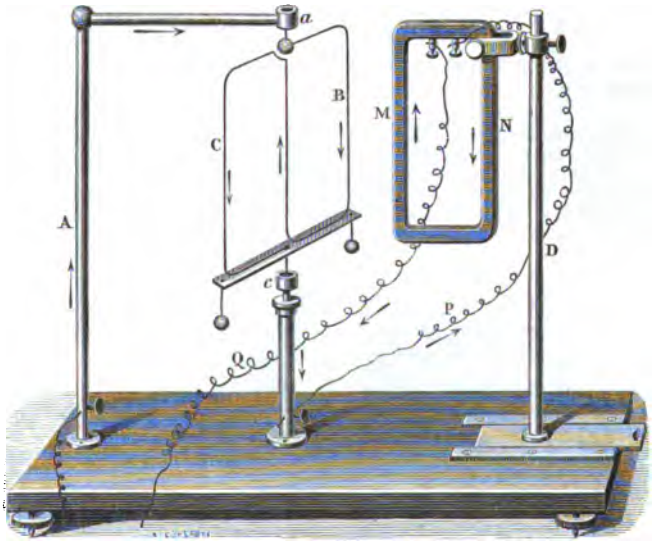


Fig. 841.

llena de mercurio, que se puede subir más ó menos. La columna A sostiene una cápsula *a*, llena también de mercurio, y que está taladrada inferiormente por un agujero capilar donde penetra la punta de una aguja de coser, fija en una pequeña bola de latón. Esta punta se prolonga hasta el mercurio y gira libremente en el tubo. Por fin, el circuito móvil se compone de un alambre de cobre rojo que parte de la bola de latón y se vuelve, en el sentido de las flechas, de la cápsula *a* á la cápsula *c* (fig. 841). Sus dos ramas inferiores se fijan á una delgada plancha de madera, y todo el sistema se lastra por medio de dos pequeñas bolas de latón suspendidas en los extremos

Demostración de las leyes. — La corriente de una pila (de 4 ó 5 pares de Bunsen por ejemplo) penetra en el aparato por la columna A (fig. 841) y después de haber recorrido el circuito móvil, y luego el multiplicador en el sentido de las flechas, vuelve á la pila por el alambre Q. Ahora bien, en la posición de la figura 841, se observa que la rama B es rechazada: lo cual demuestra la segunda ley. En la posición inversa (fig. 842), donde las corrientes son *paralelas* y *del mismo sentido*, se observa que la rama B es atraída: lo cual demuestra la primera ley.

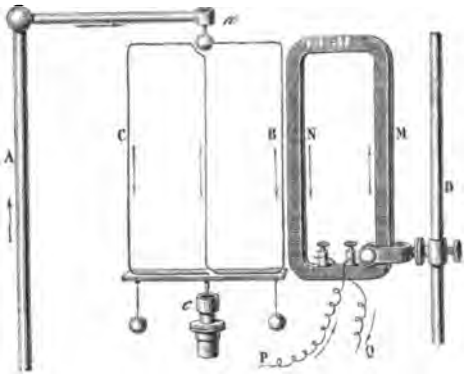


Fig. 842.

935. **Conmutador de Bertin.** — En estas experiencias es á veces necesario invertir el sentido de las corrientes. Obtiénese tal resultado por medio de pequeños aparatos llamados *conmutadores*. Se les construye de distintos sistemas. Describiremos aquí el conmutador de Bertin y más adelante el de Ruhmkorff.

El conmutador de Bertin tiene la ventaja de hacer ver inmediatamente el sentido de la corriente. Consiste en una pequeña peana donde hay un disco de ebonita que se hace girar sobre un eje central por medio de un mango *m* (fig. 843), entre dos topes de parada *c*, *c'*. Sobre el disco se colocan dos láminas de cobre, una de las cuales *o* es siempre positiva, por estar en comunicación á través del eje y de lámina + con el tope P que recibe el reóforo positivo de la pila; la otra *ie*, encorvada á modo de herradura, está en comunicación por frotamiento, debajo del disco, con una lámina —, que se dirige al tope negativo N. En el borde opuesto de la peana hay dos topes *b*, *b'*, á que se adaptan dos láminas elásticas de cobre *r*, *r'*.

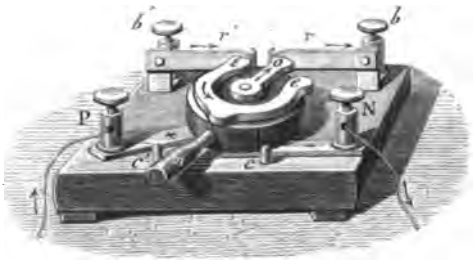


Fig. 843.

Una vez que se da vuelta al disco (fig. 843), la corriente que llega al tope P pasa á la pieza *o*, la lámina *r* y el tope *b*, que, por una segunda lámina ó por un alambre de cobre, la conduce á uno de los aparatos de Ampère (fig. 841, 842, etc.). Después, volviendo al tope *b'*, la corriente pasa á la lámina *r'*, á la pieza *ie* y por fin al tope N que la vuelve á la pila. Si el disco está orientado de manera que el mango *m* se encuentra á igual distancia de *c* y de *c'*, las piezas *o* é *ie* dejan de estar en contacto con las láminas *r*, *r'*, la corriente no pasa y el aparato fun-

ciona como *interraptor*. Si *m* es llevado hasta *c*, como la lámina *o* toca con *r'*, la corriente se dirige al tope *b'* primeramente y vuelve por *b*: entonces queda invertido.

936. **Leyes de las corrientes angulares.** — 1°. *Dos corrientes rectilíneas cuyas direcciones forman un ángulo, se atraen cuando se acercan ó se alejan ambas del vértice.*

2°. *Si una de ellas se dirige hacia el vértice del ángulo* (ó de la perpendicular común) *y la otra se aleja de él, entonces se rechazan.*

Estas leyes se demuestran por medio de un circuito móvil especial KBC (fig. 844). Disponiendo entonces el multiplicador horizontalmente, de modo que su corriente sea de análogo sentido que en

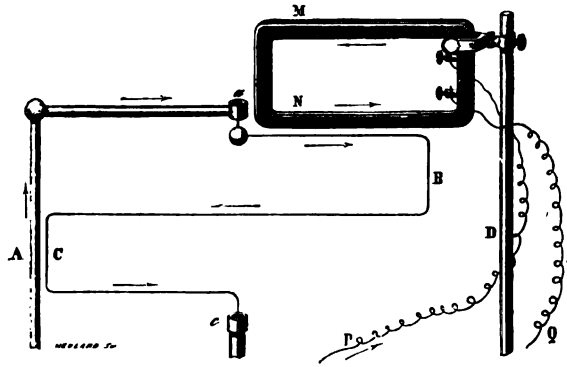


Fig. 844.

el circuito móvil, si se separa éste y se hace pasar la corriente, el circuito se aproxima en seguida. Y si se vuelve el multiplicador de modo que las corrientes sean de sentidos contrarios, inmediatamente hay repulsión.

Consecuencia. — Ampère dedujo de esta ley que *en una corriente rectilínea, dos elementos consecutivos se rechazan.*

Esta consecuencia se demuestra de ordinario como sigue: practícanse en una peana dos cavidades longitudinales que contienen mercurio, y se ponen en comunicación los dos baños por medio de un alambre de cobre encorvado, que descansa sobre ellos. Apenas una corriente que llega por el tope *a* (fig. 845) pasa del primer baño al segundo por la mediación del alambre de cobre, éste es rechazado y se aleja de los dos topes.

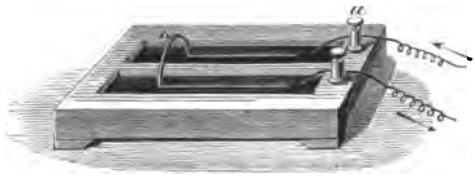


Fig. 845.

De ahí se deduce que los elementos de corriente en contacto sobre el mercurio y el cobre se rechazan; pero es de observar que los elementos de corriente que actúan uno sobre otro son más bien angulares que rectilíneos.

937. **Ley de las corrientes sinuosas.** — *La acción atractiva ó repulsiva de una corriente sinuosa es la misma que la de una corriente rectilínea que tiene las mismas extremidades.*

Esta ley no se cumple sino en tanto que la separación de las sinuosidades es muy pequeña, quiere decir, despreciable respecto de la longitud del circuito sinuoso y de la distancia á que está el circuito inmediato. Dispónese el multiplicador verticalmente (fig. 846) y se coloca muy cerca de él un circuito móvil *mn*, compuesto de una parte rectilínea descendente y de otra sinuosa ascendente. Cuando pasa la corriente, no se observa atracción ni repulsión: lo cual prueba que las acciones contrarias del multiplicador sobre el alambre rectilíneo y el alambre sinuoso son iguales.

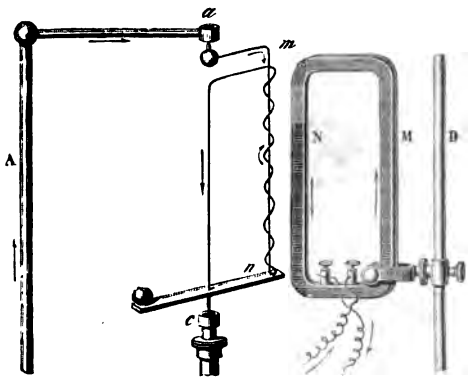


Fig. 846.

ORIENTACIÓN DE LAS CORRIENTES POR LAS CORRIENTES.

938. **Acción de una corriente indefinida sobre otra perpendicular á su dirección.** — Según la ley de las corrientes angulares, puede determinarse a priori la acción que ejerce una corriente recti-

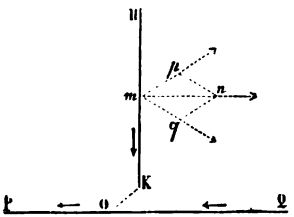


Fig. 847.

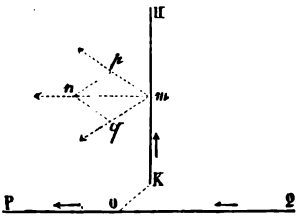


Fig. 848.

línea PQ (fig. 847), fija é indefinida, sobre una móvil KH perpendicular á su dirección. Sea OK la perpendicular común (que se reduce á un punto si las dos líneas PQ y KH se encuentran).

Supongamos que la corriente PQ se dirija desde Q hacia P en el sentido de las flechas y sea primeramente el caso de que la corriente

HK se acerque á la PQ. La porción QO atrae la corriente HK, puesto que estas corrientes se dirigen ambas hacia el vértice del ángulo formado por sus direcciones; la porción PO rechaza por el contrario á la corriente KH, puesto que las dos son de sentidos opuestos respecto del vértice del ángulo. Representemos por *mq* y *mp* las dos fuerzas, una atractiva y repulsiva la otra, que solicitan la corriente KH, y que son de la misma intensidad, puesto que todo es simétrico á ambos lados del punto O: ambas se componen en una fuerza única *mn* que tiende á arrastrar la corriente KH paralelamente á la corriente PQ, en un sentido opuesto á esta última.

Si se considera el caso en que la corriente KH se aleja de la PQ (fig. 848), es fácil reconocer que es también arrastrada paralelamente á ésta, pero en el mismo sentido que ella.

De modo que se puede enunciar la siguiente ley: *Una corriente finita móvil, que es perpendicular á otra fija indefinida, es solicitada á moverse en dirección paralela á la corriente fija: en sentido contrario del de ésta si se acerca á ella, y en el mismo sentido si se aleja.*

939. **Consecuencias.** — 1°. *Orientación de una corriente vertical única.* — Si se tiene una corriente vertical, móvil alrededor de un eje XY

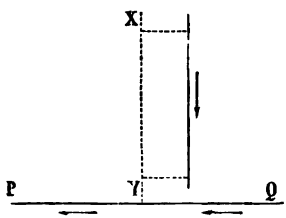


Fig. 849.

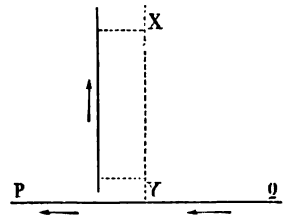


Fig. 850.

paralelo á su dirección (fig. 849 y 850), toda corriente horizontal PQ tendrá por efecto hacer girar la corriente móvil alrededor de su eje,

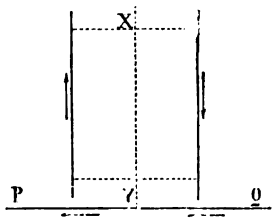


Fig. 851.

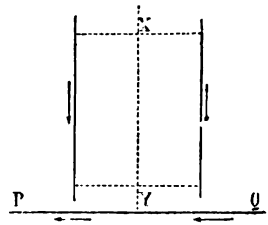


Fig. 852.

hasta que el plano definido por el eje y la corriente se haya puesto paralelo á PQ; la corriente vertical se detendrá, respecto de su eje, *por la parte de donde viene la corriente PQ* (fig. 849) *ó por la parte á donde se*

dirige (fig. 850), *según sea descendente ó ascendente*, quiere decir, según que se acerca á la corriente horizontal ó se aparta de ella.

2°. *Orientación de una doble corriente vertical.* — Un sistema de dos corrientes verticales, móviles al mismo tiempo en torno de un eje vertical (fig. 851 y 852), será dirigido, por una corriente horizontal PQ, según un plano paralelo á esta corriente, cuando de las dos corrientes verticales una es ascendente y la otra descendente (fig. 851); pero si ambas son descendentes (fig. 852) ó las dos ascendentes, el sistema no será movido.

940. **Acción de una corriente rectilínea indefinida sobre otra rectangular ó circular.** — Es fácil reconocer que una corriente horizontal indefinida ejerce sobre otra rectangular móvil en torno de un eje vertical (fig. 853) la misma acción directora que anteriormente. En efecto, según la dirección de las corrientes (indicada por las flechas), la porción QY actúa por atracción no sólo sobre la parte

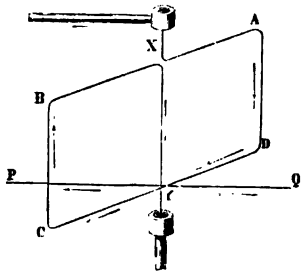


Fig. 853.

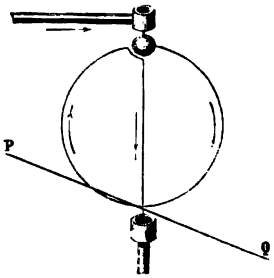


Fig. 854.

horizontal YD (ley de las corrientes angulares), sino también sobre la parte vertical AD (ley de las corrientes perpendiculares). La misma acción se verifica evidentemente entre la porción PY, y las partes CY y BC. Luego *la corriente fija* PQ *tiende á dirigir la corriente rectangular móvil* ADCB *á una posición paralela á* PQ, *y tal que sea idéntico el sentido de las dos corrientes en los alambres* CD y PQ.

Observación. — Cuanto se acaba de decir de una corriente rectangular se aplica también á otra circular (fig. 854).

ROTACIÓN DE LAS CORRIENTES POR LA ACCIÓN DE LAS CORRIENTES.

941. **Rotación de una corriente horizontal finita por acción de otra rectilínea horizontal indefinida.** — Las atracciones y las repulsiones que ejercen entre sí las corrientes angulares pueden originar, en vez de un sencillo cambio de posición, *un movimiento circular continuo.*

En efecto, sea una corriente OA (fig. 855), móvil en torno del punto O en un plano horizontal, y sea PQ una corriente indefinida

horizontal. Como estas corrientes se dirigen en el sentido de las flechas, se deduce que en OA la corriente móvil es atraída por la corriente PQ, toda vez que son de idéntico sentido. Una vez que llega á OA', la corriente móvil es atraída por la porción NQ de la corriente fija y rechazada por PN. Análogamente, en OA'' es atraída por MQ y rechazada por PM, y así sucesivamente: de donde resulta un movimiento de rotación continuo en el sentido AA'A''A'''. Luego, *por efecto de la corriente fija é indefinida* PQ, *la corriente móvil* OA *tiende á girar con movimiento continuo en una dirección retrógrada relativamente á la de la corriente fija.* Si la corriente móvil se dirigiera desde A hacia O, la rotación se efectuaría en sentido contrario.

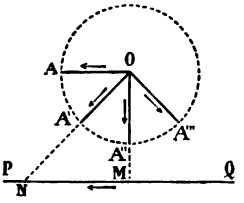


Fig. 855.

942. **Rotación de una corriente horizontal finita bajo la acción de una corriente circular horizontal.** — El efecto será también *un movimiento circular continuo* cuando una corriente ABC (fig. 856), fija y circular, situada en un plano horizontal, actúe sobre otra horizontal *mn*, rectilínea y móvil alrededor del centro *n*. Estas corrientes, dirigidas en el sentido de las flechas, se atraen en el ángulo *n* AC, pues ambas van hacia el vértice (936, 1°). Por el contrario, en el ángulo *n*AB se rechazan, pues una va hacia el vértice, mientras que la otra se aleja de él. Los dos efectos concurren pues para hacer girar el alambre *mn* en el sentido ACB.

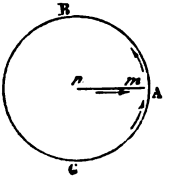


Fig. 856.

943. **Rotación de una corriente vertical bajo la influencia de una corriente circular horizontal.** — Una corriente circular horizontal que actúa sobre otra rectilínea vertical, le imprime también *un movimiento de rotación continuo.*

Pruébase esta rotación por medio de un vaso de cobre rojo alre-

Fig. 857.

dedor del cual se arrolla una lámina del mismo metal aislada con seda ó con lana, y recorrida por una corriente (fig. 857). En el centro

del vaso hay una columna de latón *a*, terminada en una cápsula que contiene mercurio. En éste penetra un eje giratorio que sostiene un alambre de cobre rojo *bb*, encorvado en sus extremos en dos ramas verticales que van á soldarse con un anillo muy ligero de cobre rojo que penetra en el agua acidulada contenida en el vaso. La corriente de una pila que llega por el alambre *m* se dirige á la lámina A, desde donde, al cabo de varias vueltas en torno del vaso, llega á la lámina B y luego pasa por debajo á la parte inferior de la columna *a*. Subiendo por esta columna, penetra en los alambres *bb*, en el anillo de cobre rojo, en el agua acidulada, y en las paredes del vaso, de donde vuelve á la pila por la lámina D. Una vez cerrado así el circuito, la armadura *bb* y el anillo se ponen á girar en sentido contrario al de la corriente fija. Este movimiento se debe á la acción de la corriente circular sobre la de las ramas *bb* : la rama *b* de la derecha es atraída hacia adelante por la porción A del circuito fijo, y la rama *b* de la izquierda es atraída en sentido contrario por la porción opuesta. Cuanto á la acción de la corriente circular sobre la parte horizontal del circuito *bb*, contribuye á hacer girar en el mismo sentido; pero su acción es poco sensible, á causa de la distancia.

944. **Ley elemental. — Cálculo de Ampère.** — Ampère calculó, fundándose en las leyes experimentales antes demostradas, la *ley elemental* de las acciones electrodinámicas, esto es, la expresión analítica de la fuerza que se ejerce entre dos *porciones infinitamente pequeñas ó elementos* de corrientes de intensidad y posición dadas.

Sean *m n* y *m' n'* dos elementos de dos corrientes de intensidades *i* é *i'* (fig. 858); sean λ y λ' sus longitudes, *r* la distancia OO' de sus medios, θ y θ' los ángulos que forman con la línea OO', y ω el ángulo de sus dos direcciones. Ampère obtuvo así la expresión siguiente de la fuerza recíproca *f*, que se ejerce entre estos dos elementos:

$$[1] \qquad f = \frac{ii'\lambda\lambda'}{r^2}\left(\cos\omega - \frac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right).$$

La fuerza *f* es *positiva* ó *negativa*, según que las dos corrientes *se rechazan* ó *se atraen*.

945. **Consecuencias.** — Conociendo esta ley elemental, es posible calcular la ac-

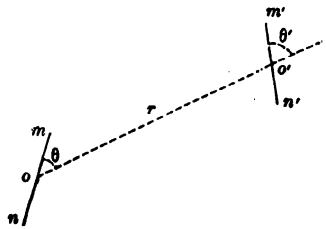


Fig. 858.

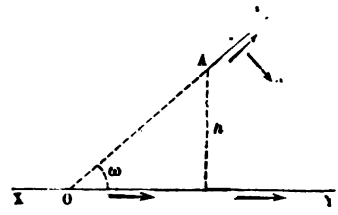


Fig. 859.

ción que se ejerce entre dos porciones finitas de corrientes, dispuestas de modo cualquiera una respecto de otra.

Ejemplo. — *Acción de una corriente indefinida* XY *sobre una corriente finita* AB (fig. 859). Aplicando la fórmula [1] se encuentra que la acción se reduce á una

fuerza R normal á AB, que tiende á disminuir el ángulo de las dos corrientes si ambas se acercan ó se alejan del vértice, y que tiende á aumentar el ángulo si una de las corrientes se aleja mientras que la otra se acerca al vértice.

La intensidad de esta resultante está dada, en el caso general, por la fórmula

$$[2] \qquad R = ii'\left(\frac{l}{h} - \frac{1}{2}\frac{l^2}{h^2}\operatorname{sen}\omega + \ldots\right),$$

en donde l es la longitud AB, h la distancia del extremo A á XY, ω el ángulo de las corrientes, é i, i' sus intensidades. El factor colocado entre paréntesis es la suma de una serie indefinida de términos cada vez más pequeños.

Caso particular. — Si h es grande relativamente á l, quiere decir, si la corriente móvil se encuentra á gran distancia, la fracción $\frac{l^2}{h^2}$ es despreciable y, *a fortiori*, las potencias son de un orden más elevado. La fórmula precedente se reduce entonces á

$$[3] \qquad R = \frac{ii'\,l}{h}.$$

Luego, la atracción ó la repulsión de una corriente indefinida sobre otra finita, suficientemente alejada, es una *fuerza constante, normal á la corriente móvil, proporcional á su longitud, independiente de su orientación é inversamente proporcional á la simple distancia.*

Este es el caso más común en la práctica. La fórmula se aplica en particular á la mayor parte de las experiencias antes descritas.

CORRIENTE TERRESTRE.

946. **Acción de la tierra sobre las corrientes.** — Las acciones que el globo terrestre ejerce sobre las corrientes móviles, aisladas de cualquier otra corriente, se incluyen entre los fenómenos electrodinámicos. Se ha observado que la tierra influye sobre esas corrientes, lo mismo que sobre los imanes, imprimiéndoles ya una orientación determinada, ya un movimiento de rotación continuo, según que estas corrientes se encuentran dispuestas en una dirección vertical ú horizontal.

947. **Orientación de las corrientes verticales.** — LEY. — *Toda corriente vertical móvil en torno de un eje que le es paralelo, va á colocarse, por la acción de la tierra, en un plano perpendicular al meridiano magnético, y se para, después de algunas oscilaciones, al este de su eje de rotación cuando es descendente y al oeste cuando es ascendente.*

Experiencia. — Esta ley se demuestra por medio de un aparato formado de dos vasos de cobre rojo a y K (fig. 861) de magnitudes desiguales. El mayor a, que tiene unos 30 centímetros de diámetro, está taladrado en su centro por una abertura á través de la cual pasa una columna de latón b, aislada del vaso a, pero que comunica con el vaso K. Esa columna termina en una cápsula donde descansa, sostenido por un eje giratorio, un ligero vástago de madera. En uno de los extremos de este vástago se arrolla un alambre fino de platino ce, cada una de cuyas puntas penetra en el agua acidulada que llena los dos vasos.

La corriente de una pila, que llega por el alambre m, pasa á una lámina de cobre que va á soldarse con el pie de la columna b por debajo de la peana de madera del aparato; entonces sube por b, penetra en el vaso K, lleno de agua acidulada, sube desde ahí al alambre c, vuelve á bajar por el e y, dirigiéndose á las paredes del vaso a por la masa del agua acidulada que éste contiene, alcanza el alambre n, que la vuelve á la pila. Desde que el circuito queda cerrado, se ve al alambre e moverse alrededor de la columna b y pararse *al este* de esta columna

cuando la corriente es *descendente*, según ocurre en el dibujo; pero si es *ascendente*, lo cual se realiza por medio de un conmutador *n*, el alambre *e* se para *al oeste*, en una posición diametralmente opuesta á la anterior.

Si se reemplaza el vástago de un solo alambre por una armadura móvil de dos (fig. 860), la corriente no es movida; pues como cada alambre tiende á colocarse

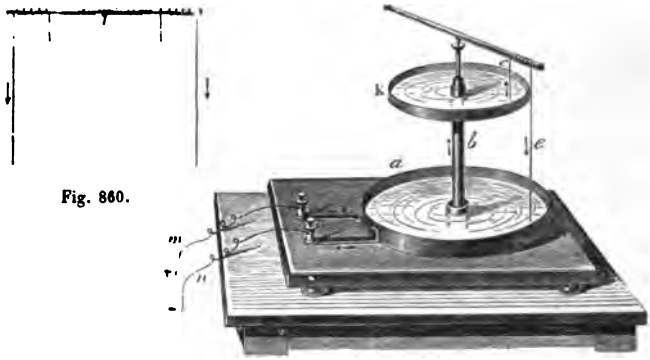


Fig. 860.

Fig. 861.

al este de la columna *b*, se producen dos efectos iguales y de direcciones contrarias, que se equilibran : el sistema constituye una corriente *astática*.

Hipótesis de la corriente terrestre. — Así como se explica fácilmente la acción de la tierra sobre los imanes por la hipótesis de un imán terrestre, del mismo modo se explica su acción sobre una corriente vertical por la hipótesis de una corriente terrestre. En la experiencia anterior ocurren las cosas como si *una corriente indefinida, que fuera de este á oeste*, actuara sobre la corriente móvil, *perpendicularmente* á su dirección.

948. **Rotación de las corrientes horizontales móviles alrededor de un eje vertical.** — *Ley.* — La acción de la tierra sobre las corrientes horizontales no consiste en dirigirlas, sino en imprimirles *un movimiento de rotación continuo : la rotación se verifica de este á oeste, pasando por el norte, cuando la corriente horizontal se aleja del eje de rotación, y del oeste al este cuando se acerca á él.*

Experiencia. — Esta ley se demuestra por medio de un aparato que no se diferencia del anterior sino en que no tiene más que un vaso (fig. 862). La corriente sube por la columna *a*, pasa por los dos alambres *cc* y baja por *bb*, volviendo á la pila. El circuito *bccb* se pone entonces á girar con movimiento continuo, de este á oeste ó de oeste á este, según que en los alambres *cc* es la corriente centrífuga ó centrípeta. Pero se ha visto (947) que la acción de la tierra sobre los alambres verticales *bb* es anulada; luego la rotación *cc* se produce por su acción sobre las ramas horizontales.

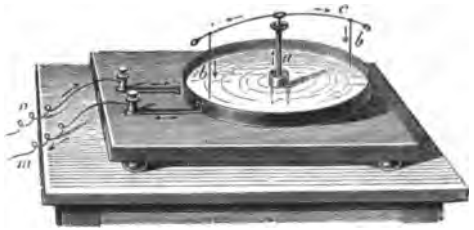


Fig. 862.

949. **Posición de la corriente terrestre.** — Esta experiencia, como la anterior, puede explicarse por la acción de una corriente terrestre, que va del este al oeste magnéticos. Además, permite determinar la situación de la corriente terrestre. En efecto, ésta puede tener tres posiciones respecto de la horizontal

móvil, á saber : hallarse sea al norte, sea al sur de ella, sea *debajo* y *en el mismo plano* del eje de rotación. Ahora bien, de las leyes de la electrodinámica resulta que :

1°. Si la corriente terrestre estuviera al *norte*, la móvil giraría de este á oeste *pasando por el sur*, lo cual es contrario á la experiencia.

2°. Si la corriente terrestre estuviera *por debajo*, la móvil permanecería en equilibrio desde que se pusiera paralela á la directora y del mismo sentido : no giraría pues de manera continua, según realmente ocurre.

3°. Si la corriente terrestre está *al sur*, las cosas deben ocurrir por el contrario según la experiencia indica.

Todo ocurre, pues, como si la corriente terrestre estuviera al sur de las móviles. Los fenómenos y, por consiguiente, la conclusión, parecen ser los mismos en todos los puntos de nuestro hemisferio. Por lo demás, si nos transportáramos al hemisferio sur, hallaríamos que en todos los lugares el movimiento de rotación se efectuaría en sentido inverso. De ahí se deduciría, por los mismos razonamientos, que la corriente terrestre se encuentra al norte de ese hemisferio.

Luego, resumiendo, la tierra actúa en todos los puntos como una *corriente indefinida que girara de este á oeste, al rededor y en el mismo plano del ecuador magnético.*

950. **Orientación de las corrientes cerradas, móviles en torno de un eje vertical.** — Si el circuito está cerrado, sea rectangular ó circular, ya no se produce *un movimiento de rotación continua*, sino una sencilla *orientación*, como en el caso de las corrientes verticales.

La corriente va á colocarse en un plano perpendicular al meridiano magnético, de tal modo que sea descendente al este de su eje de rotación para un observador que mira al norte, y ascendente al oeste.

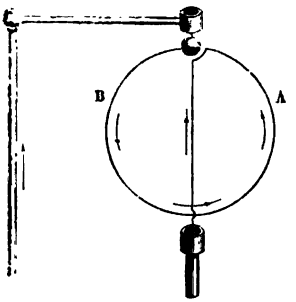


Fig. 863.

Este hecho es una consecuencia directa de las leyes anteriores. De ellas resulta efectivamente que en el circuito cerrado (fig. 863) las acciones de la tierra sobre las partes horizontales, inferior y superior, son iguales é inversas y, por consiguiente, se equilibran, mientras que en las laterales tiende la corriente á colocarse por un lado al este y por el otro al oeste (ley de las corrientes verticales).

951. **Corrientes astáticas.** — De manera que en las experiencias de electrodinámica es necesario sustraer los circuitos móviles á la acción directora de la tierra. Para ello basta con darles forma simétrica respecto de su eje de suspensión. De esta manera las acciones directoras de la tierra sobre las dos partes del circuito tienden á hacerlas girar en sentidos contrarios y, por consiguiente, se destruyen. Esta condición es satisfecha en los circuitos que representan las figuras 842 y 844. Por esto se da á las corrientes que los recorren el nombre de *corrientes astáticas.*

CAPÍTULO VI

EFECTOS MECÁNICOS DE LAS CORRIENTES.

ELECTROMAGNETISMO.

952. **Efectos mecánicos de las corrientes sobre los imanes.** — La acción que las corrientes ejercen sobre los imanes se manifiesta por tres clases de efectos: 1°. efectos de orientación; 2°. efectos de rotación; 3°. efectos de atracción ó de repulsión. Además, esos efectos todos son *recíprocos*, quiere decir que los imanes actúan recíprocamente sobre las corrientes para dirigirlas, hacerlas girar, y atraerlas ó rechazarlas. El estudio de estas acciones y reacciones entre los imanes y las corrientes constituye el *electromagnetismo*.

953. **Orientación de los imanes por las corrientes.** — 1°. *Experiencia de Œrsted.* — *Regla de Ampère.* — La acción directora de las corrientes sobre los imanes fué descubierta en 1820 por Œrsted, profesor de física en Copenhague. Esta es una de las experiencias fundamentales de la electricidad dinámica.

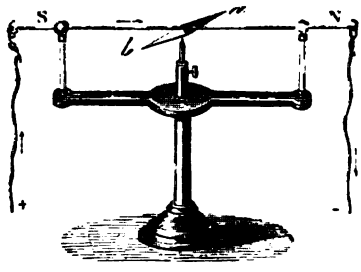


Fig. 864.

Para repetirla se tiende horizontalmente, en la dirección del meridiano magnético, un alambre de cobre por encima de la aguja imantada (fig. 864) móvil sobre un eje vertical. Mientras el alambre no es recorrido por una corriente, la aguja permanece paralela á él; pero apenas se lanza la corriente, *la aguja se desvía y se acerca tanto más á la dirección perpendicular á la corriente cuanto más intensa es ésta.*

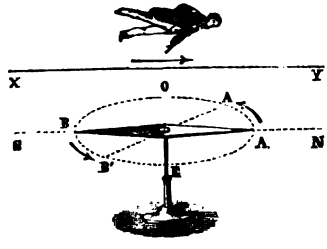


Fig. 865.

Regla de Ampère. — El sentido de la desviación depende al mismo tiempo de la dirección de la corriente y de la posición del alambre respecto de la aguja. Ampère logró abarcar y prever todos los casos que pueden presentarse en este enunciado único, llamado *regla de Ampère: El polo austral del imán móvil se desvía siempre hacia la izquierda de la corriente.*

Llama *izquierda* de la corriente á la de un observador colocado en el alambre que une los dos polos de tal modo que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza cuando él mira á la aguja (fig. 865).

954. **Orientación de las corrientes por los imanes.** — *La acción directora de las corrientes sobre los imanes es recíproca.* — En el experimento de Œrsted (fig. 864), como la aguja imantada es móvil y la corriente fija, lo que se mueve para formar la cruz es la aguja. Pero si al contrario el imán es fijo y móvil la corriente, ésta es la que cambia de posición y va á ponerse en cruz con el imán, ocupando siempre la izquierda el polo austral.

Para demostrarlo, se hace pasar una corriente por un circuito móvil (fig. 866). Acercando entonces una barra imantada, se ve que

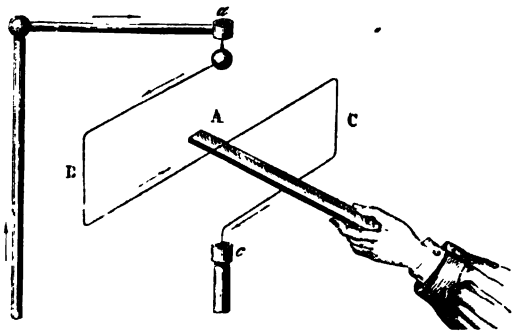


Fig. 866.

el circuito gira, poniéndose en cruz con la barra al cabo de algunas oscilaciones.

955. **Rotación de los imanes bajo la influencia de las corrientes.** — Los efectos de rotación han sido demostrados por Faraday mediante las experiencias siguientes (fig. 867) : 1°. En el centro de una ancha probeta llena de mercurio penetra una barra imantada A, de unos 20 centímetros de largo, lastrada en su parte inferior por medio de un apéndice de platino, y que se eleva algunos milímetros sobre el nivel del mercurio. En la parte superior de la barra hay una cavidad que contiene mercurio. Una corriente, que sube por la columna *m*, llega al mercurio y á la barra, desde donde, radiando en torno de ésta, pasa á una pieza anular de cobre G (fig. 869), que penetra en el mercurio á lo largo de la pared de la probeta, pasa á la columna *n* y vuelve á la pila. Apenas pasa la corriente se observa que la barra gira alrededor de su eje con velocidad creciente, que depende de su momento magnético y de la intensidad de la corriente. Cuanto al sentido de la rotación, depende de la dirección de la corriente y de la naturaleza del polo que flota en la superficie del mercurio. Si este

es el polo norte y si la corriente es descendente hacia el imán (fig. 867), la rotación se efectúa en el sentido de las agujas de un

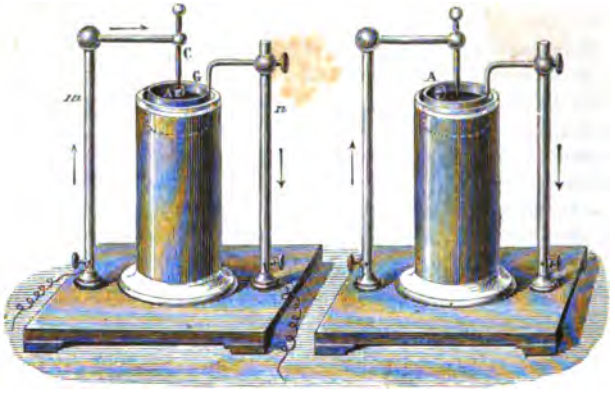


Fig. 867. Fig. 868.

reloj. Ocurre en el contrario cuando se invierte el sentido de la corriente, ó si el que flota en su superficie es el polo sur.

2°. Cuando se dispone la experiencia como en la figura 868, no sólo

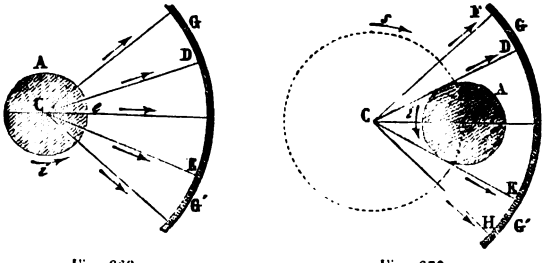


Fig. 869. Fig. 870.

gira la barra sobre sí misma, sino también en torno del eje vertical que pasa por el vástago C (fig. 870).

956. **Rotación de las corrientes por acción de los imanes.** — *La acción rotatoria de las corrientes sobre los imanes es recíproca.* — Esta ley se demuestra por medio del experimento siguiente, que se debe á Faraday:

Sobre una peana de tornillos de nivel se fija una columna de cobre bD, aislada por un contacto de marfil, á lo largo de la cual se eleva un tubo metálico (fig. 871), rodeado por un haz imantado AB. En lo alto de la columna hay una cápsula que contiene mercurio donde penetra una punta de acero. Á ésta se encuentra adaptado un circuito EF de cobre rojo, cuyos extremos presentan puntas de acero que penetran en un depósito lleno de mercurio

Hácese llegar la corriente de una pila (4 ó 5 pares Bunsen) al tope *b*; desde allí sube por la columna D, baja por las dos ramas E, F, penetra en el mercurio por las puntas de acero, y se dirige por el pie de cobre al tope *a*, volviendo por ahí á la pila. Ahora bien, si entonces se sube el haz imantado, según indica el dibujo, el circuito móvil EF toma un movimiento de rotación rápida en un sentido ó en el otro, según que se encuentra sometido á la acción del polo Norte ó del polo Sur del imán.

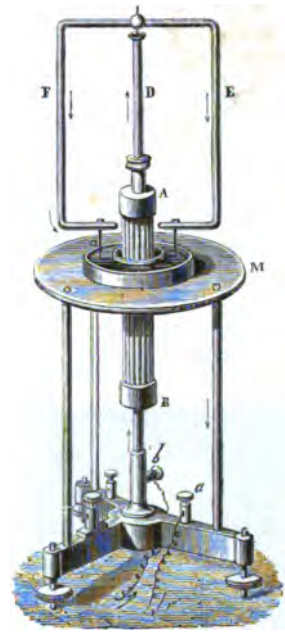


Fig. 871.

957. **Efectos de movimiento.** — Consisten en atracciones y repulsiones ejercidas por las corrientes sobre los imanes. Los observaron Biot y Savart; Laplace dedujo de los experimentos de esos físicos la *ley elemental de las acciones electromagnéticas*, y esa ley fué demostrada posteriormente por los trabajos experimentales de Pouillet y de Boisgiraud.

Experiencias de Biot y de Savart. — 1°. Tómase una aguja de hacer calceta imantada y se la suspende por una de sus puntas de un hilo muy delgado; en las inmediaciones de la aguja se tiende un alambre de cobre horizontal: así que la corriente pasa, se observa una atracción ó una repulsión, según el sentido.

2°. Una vez que Biot y Savart pusieron en evidencia esta fuerza atractiva determinaron *la ley según la cual varía con la distancia*. Para ello tomaron un imán prismático muy pequeño, colgado de hilo de seda sin torcer y perfectamente *libre* de oscilar horizontalmente, pues lo hicieron *astático* por medio de una fuerte barra imantada, dispuesta de manera oportuna en las inmediaciones. Un conductor rectilíneo vertical, de 10 pies de largo, se disponía sucesivamente á distancias variables de la barra. Apenas se lanzaba esta corriente, la aguja se desviaba conforme á la regla de Ampère, poniéndose á oscilar como un péndulo geodésico, que se hubiera apartado de su posición de equilibrio. Aplicando el método de las oscilaciones, calculaban la fuerza directora en cada posición. Así fueron conducidos á formular la ley siguiente.

La acción de una corriente vertical indefinida sobre un polo de imán varía en razón inversa de la simple distancia.

958. **Ley elemental. — Fórmula de Laplace.** — Aplicando el cálculo á estas leyes, descubrió Laplace que la acción ejercida por un elemento de corriente sobre un polo magnético varía *en razón inversa del cuadrado de la distancia y proporcionalmente al seno del ángulo* que forma, con la dirección de la corriente, la línea que une su centro al polo magnético. Esta fuerza se aplica al elemento de la corriente, perpendicularmente al plano determinado por el elemento y el polo, y se dirige conforme á la regla de Ampere (fig. 872). La ley elemental se expresa por la fórmula

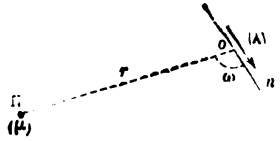


Fig. 872.

$$[I] \qquad f = \frac{\mu I \lambda}{r^2} \operatorname{sen} \omega,$$

en que *f* representa la *acción elemental*, I la intensidad de la corriente y λ su longitud, μ la masa magnética del polo, *r* su distancia y ω el ángulo del elemento con la línea NO.

959. **Diversas expresiones de la fórmula de Laplace. — Aplicaciones.** — La acción elemental es susceptible de una forma más general, usada con frecuencia;

$\frac{\mu}{r_2}$ es la acción que ejercería el polo μ sobre el polo + 1, situado en el punto donde se encuentra el elemento de corriente : este es el campo producido por el polo μ á la distancia r. Sea H su valor ; entonces se puede escribir.

$$[II] \qquad f = HI\lambda \operatorname{sen} \omega.$$

De manera que para calcular f bastará conocer el campo magnético *en el lugar donde se encuentra el elemento de corriente* sin preocuparse del origen de este campo, que puede evidentemente ser considerado como debido á un polo conveniente.

La acción f es perpendicular al plano determinado por el campo y el elemento de corriente y está dirigido hacia la izquierda del observador de Ampère, que mira en el sentido del campo. Puede observarse también que H λ sen ω es el área ΔS del paralelógramo que tiene como lados H y λ, y escribir

$$[III] \qquad f = I\Delta S.$$

Cálculo de la acción ejercida por un campo magnético uniforme en un circuito dado (rueda de Barlow y corriente horizontal). — 1°. Consideremos (fig. 873), una *rueda de Barlow ó disco de Faraday* orientado perpendicularmente al meridiano magnético, y móvil en torno de un eje BO dirigido según el meridiano : una corriente de intensidad I, que pasa por el contacto B, va desde C á A siguiendo un radio y regresa por el alambre AP. Según la regla anterior, como $\omega = \frac{\pi}{2}$, la fuerza F que actúa sobre OA tiene como valor HIR; esa fuerza está aplicada en medio del radio y en el plano de la rueda, pues las fuerzas que actúan sobre elementos iguales de OA son iguales y perpendiculares al mismo tiempo á OA y H. La rueda se pondrá pues á dar vueltas en el sentido de la flecha. El trabajo por vuelta es igual á

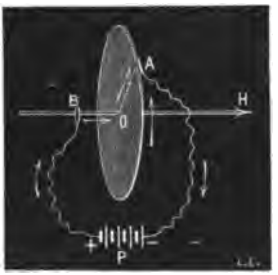


Fig. 873.

$$F \times 2\pi \frac{R}{2} = \pi HIR^2 = SHI,$$

siendo S la superficie del disco.

2°. La misma fórmula [I] prueba que el sistema representado por la figura 872 es astático para la componente horizontal del campo terrestre : este sistema sólo sufre la acción de la componente vertical Z. Si $2d$ es la proyección sobre el horizonte de la línea cc, el trabajo por vuelta tiene como valor

$$2\pi d^2 ZI.$$

960. **Rotación electrodinámica y electromagnética de los líquidos.** — En las experiencias de electrodinámica descritas anteriormente, la rotación se obtiene haciendo actuar una corriente fija sobre otra lineal móvil. Lo mismo ocurre en las experiencias de rotación electromagnética. Pero esta condición de un circuito lineal no es necesaria. Ya se ha visto (fig. 867 y 868) transmitido el movimiento de rotación á una masa magnética más ó menos considerable, y desde el descubrimiento de la electrodinámica se demostró que hasta los líquidos, tales como el mercurio y el agua, pueden girar, á la manera de los circuitos metálicos, obedeciendo á la acción de las corrientes.

SOLENOIDES.

961. **Solenoides y Cilindros electrodinámicos.** — La semejanza de las corrientes y de los imanes, revelada por la acción directora de la Tierra y confirmada por las acciones y las reacciones electromagnéticas, llega hasta la identidad, por lo que toca á las acciones exteriores, en las propiedades del solenoide que imaginó Ampère.

El *solenoide* propiamente dicho, tal como Ampère lo definió, no es sino una concepción matemática; consiste en una reunión de corrientes cerradas, *infinitamente pequeñas*, perpendiculares todas á una misma línea que pasara por sus centros de gravedad y que se dirigen en el mismo sentido. El solenoide más sencillo sería por ejemplo una serie de corrientes circulares infinitamente pequeñas, perpendiculares á una misma recta que pasara por sus centros.

El aparato que corresponde á esta definición es tan imposible de realizar experimentalmente como el *péndulo simple*; pero con el nombre de *cilindro electrodinámico* se construye un aparato que es al solenoide de Ampère lo que el *péndulo compuesto* es al simple.

Consiste en un sistema de corrientes helicoidales, iguales y paralelas, formado por un mismo alambre de cobre, cubierto de seda y doblado sobre sí mismo en forma de hélice (fig. 874), y que después

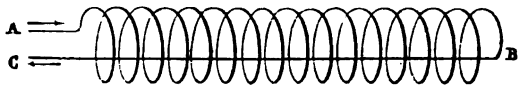


Fig. 874.

vuelve según el eje, sea en lo interior sea por fuera de la hélice, de modo que la corriente rectilínea sea exactamente igual á la suma de las proyecciones de las corrientes sinuosas sobre el eje.

Este sistema de corrientes helicoidales es equivalente : 1°. á un sistema de corrientes circulares que tienen el mismo radio que el cilindro director de las espiras y de número igual al de éstas; 2°. á una corriente rectilínea que tenga una longitud igual á la suma de los pasos de estas espiras, quiere decir á la longitud del cilindro director. Como esta corriente rectilínea es destruída por la parte BC que vuelve en sentido inverso, sólo queda el sistema de corrientes circulares. Por otra parte, se demuestra que un sistema de corrientes circulares de radio finito es equivalente á un haz de corrientes circulares infinitamente pequeñas, todas paralelas y del mismo sentido todas. Por consiguiente, un cilindro electrodinámico equivale á un haz de solenoides, así como un péndulo compuesto es equivalente de un haz de péndulos simples. Por esto se da generalmente el nombre de *solenoide* al cilindro electrodinámico.

962. **Acción de las corrientes sobre los solenoides.** — Las leyes experimentales relativas á la acción de las corrientes rectilíneas fijas sobre las corrientes finitas, rectangulares ó circulares, se aplican evidentemente á cada una de las espiras de un cilindro electrodinámico. De ahí resulta que *una corriente rectilínea tiende á dirigir circuitos paralelamente á sí misma.*

Compruébase este hecho por medio de un solenoide construído de manera que se puede hacerle móvil en torno de un eje vertical (fig. 875). Si se coloca debajo paralelamente á su eje, un alambre rectilíneo PQ atravesado por una corriente que pasa al mismo tiempo por los alambres del solenoide, se ve que éste *gira* y se *pone en cruz con la corriente.* En esta posición de equilibrio, sus espiras se encuentran paralelas á la corriente fija y además, en la parte inferior de cada una de ellas, la corriente es del mismo sentido que en el alambre rectilíneo.

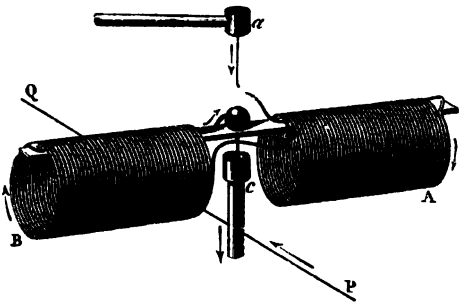


Fig. 875.

Si se coloca la corriente rectilínea verticalmente á un lado, se observa sea una atracción, sea una repulsión, según que en el alambre vertical y en la parte del solenoide más cercana, son del mismo sentido ó de sentidos contrarios las dos corrientes.

963. **Acción directora de la tierra sobre los solenoides.** — *La tierra actúa sobre los solenoides como sobre las corrientes cerradas ó los imanes.*

En efecto, si se pone el solenoide de suspensión sobre su sostén (fig. 840) y se le dirige primero fuera del meridiano magnético, se observa que desde que se lanza por el aparato una corriente enérgica, pónese en movimiento, parándose al fin en determinada posición de equilibrio : entonces tiene una dirección tal, que su eje es paralelo á la aguja de declinación. Además, la corriente se dirige de este á oeste en la parte inferior de sus espiras.

El solenoide se conduce pues por acción del magnetismo terrestre como si fuera una aguja imantada; hay en consecuencia razón para llamar *polo norte*, como en los imanes, á la extremidad que se dirige hacia el norte, y *polo sur* á la que se dirige hacia el sur.

964. **Acciones mutuas de los imanes y de los solenoides.** — Entre los solenoides y los imanes se observan los mismos fenómenos de atracción y de repulsión que entre los imanes.

En efecto, si se presenta á un solenoide móvil, recorrido por una corriente, uno de los polos de una gruesa barra imantada, hay repulsión ó atracción, según que los polos del imán y del solenoide puestos en presencia son del mismo nombre ó de nombres contrarios. Recíprocamente, el mismo fenómeno ocurre si se presenta á una aguja imantada móvil un solenoide que se mantiene en la mano y que es recorrido por una corriente.

965. **Acciones mutuas de los solenoides.** — Cuando se hacen actuar uno sobre otro dos solenoides recorridos por una corriente bastante intensa manteniendo uno en la mano y disponiendo el otro móvil sobre un eje vertical (fig. 876), se observan entre las extremi-

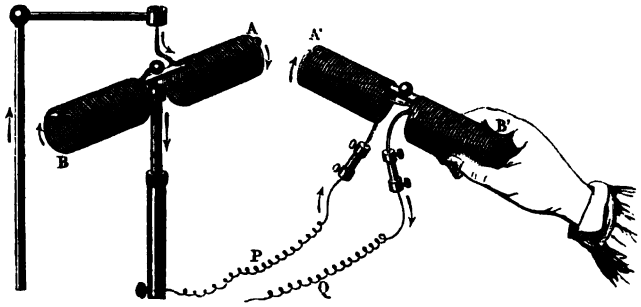


Fig. 876.

dades de estos dos solenoides fenómenos de atracción y de repulsión idénticos á los que presentan entre sí los polos de los imanes; estos fenómenos pueden preverse según la dirección relativa de las corrientes en las extremidades puestas en presencia.

966. **Experiencias de Weber. — Momento magnético de un carrete.** — Weber ha demostrado, por medio de experiencias análogas á las de Gauss, que se puede sustituir á un imán cualquiera de momento M un carrete cubierto de *n* espiras cuya superficie total es igual á S, si se hace pasar por el carrete una corriente I, tal que se tenga SI = M. El producto SI de la superficie total de un carrete por la intensidad electromagnética de la corriente que la cruza, se llama *momento magnético* del carrete. Este es el momento del imán que equivaliera al carrete en lo relativo á las acciones electromagnéticas exteriores. Por el método de Gauss se puede determinar el producto SI. H y el cociente $\frac{SI}{H}$, y por consiguiente SI y H. De ahí resulta que el momento del par director ejercido por la tierra sobre un marco móvil alrededor de un eje vertical es igual á SIH. Por otra parte se ha visto como permite calcular este par la ley de las reacciones electromagnéticas. Es posible valorarlo, sea por el método de las oscilaciones, sea equilibrándolo mediante otro par de torsión capaz de mantener la espira en el plano del meridiano.

967. **Teoría de Ampére sobre el magnetismo.** — El conjunto de estos experimentos prueba que los solenoides se conducen exactamente como los imanes, y parecen constituídos del mismo modo. Fundándose en estos hechos imaginó Ampère una teoría del magnetismo que hizo entrar todos los fenómenos magnéticos en el campo de la electrodinámica.

Admitió la existencia de corrientes circulares en torno de cada partícula de las sustancias magnéticas. Cuando estas sustancias no están imantadas, sus corrientes particulares se cruzan en todas direcciones, y la resultante de sus acciones electromagnéticas es nula; pero bajo la influencia de un imán ó de una corriente pode-

rosa, esas corrientes se orientan y toman cierta posición de equilibrio, conforme á las leyes de la electrodinámica; entonces quedan orientadas en el mismo sentido y en planos perpendiculares á líneas que contienen sus centros y están dispuestas simétricamente en torno del eje de la barra que se imanta, de modo que éste se convierte en un verdadero *haz de solenoides*, cuyo conjunto actúa como un solenoide único.

968. **Diferencia entre los solenoides y los imanes.** — Entre los solenoides y los imanes existe una diferencia y es que en los primeros están los polos *en los extremos mismos*, mientras que en los imanes se encuentran, según hemos visto, *á cierta distancia de los extremos*, distancia que aumenta con el diámetro de las barras.

Esta diferencia no se encuentra en contradicción con la teoría de Ampère. En efecto, calculando la posición de los polos de un solenoide único, se halla que deben estar *rigorosamente en cada extremo*. Pero una barra imantada no es un solenoide único, sino un haz de solenoides. Estos solenoides elementales son rectilíneos en la parte central de la barra, mientras que cerca de la superficie, sobre todo en sus polos, se encorvan presentando su convexidad hacia el eje de la barra. Sus polos se acercan así á la sección media del mismo imán, y lo mismo pasa con los polos del imán, que no son más que los puntos de aplicación de la resultante de las fuerzas aplicadas á todos los polos de los solenoides elementales : cada uno de éstos corresponde á un filete magnético solenoidal antes definido.

969. **Dirección de las corrientes de Ampère en los imanes.** — Es posible reconocer en qué sentido están dirigidas las corrientes de Ampère en los imanes. Consideremos, en efecto, un solenoide móvil, recorrido por una corriente (fig. 875). Cuando se encuentra en equilibrio en el meridiano magnético, su polo norte A está dirigido hacia el norte. Según la acción directora que la tierra ejerce sobre las corrientes cerradas, la corriente en la parte inferior de cada espira se dirige del este al oeste, ó lo que equivale á lo mismo, de la izquierda á la derecha del observador cuando éste se encuentra en la prolongación del eje del solenoide, mirando al polo norte. Si se mira al polo sur, ocurre lo inverso : entonces la corriente se dirige de derecha á izquierda en la parte inferior de cada espira.

Por consiguiente, *si nos colocamos frente al polo sur de un imán, las corrientes de Ampère parecen dirigidas en el sentido de las agujas de un reloj, y en sentido contrario si miramos al polo norte.*

970. **Corriente terrestre.** — Para explicar el *magnetismo terrestre*, admitió Ampère la existencia de corrientes eléctricas que circulan alrededor del globo, de este á oeste, perpendicularmente en cada punto al meridiano magnético. Estas corrientes deben equivaler sumando sus efectos, á una corriente resultante única, que se dirigiera de este á oeste y recorriera el ecuador magnético. Cuanto á su origen, serían corrientes termo-eléctricas, debidas á las variaciones de temperatura que resultan de la acción sucesiva del sol sobre los diferentes puntos de la superficie del globo, por efecto del movimienio diurno.

Estas corrientes deben ser las que dirigen las agujas de las brújulas y de los solenoides y que actúan sobre las corrientes horizontales y verticales.

La hipótesis de la corriente terrestre está perfectamente conforme con las leyes experimentales de la acción de la tierra sobre las corrientes.

APLICACIONES DEL ELECTROMAGNETISMO. — SISTEMA DE LAS UNIDADES LECTRICAS ABSOLUTAS C. G. S.

971. **Definiciones.** — Gauss fué quien primero concibió la idea de reemplazar las unidades arbitrarias en la medición de las magnitudes eléctricas y magnéticas por un sistema de unidades *absolutas*, esto es, que sólo dependen de reducido número de unidades fundamentales. Estas unidades fundamentales, llamadas *unidades absolutas*, han podido reducirse á tres : una de *tiempo*, el *segundo;* una de *longitud*, el *centímetro;* y una de *masa mecánica*, *la masa del gramo*. Son las unidades llamadas C. G. S.

Hay cuatro magnitudes eléctricas principales : la cantidad de electricidad Q, la intensidad de la corriente I, la fuerza electromotora de las pilas E, y la resistencia de los conductores R. Ahora bien, entre estas tres cantidades existen tres ecuaciones que son las expresiones de tres leyes físicas :

[1] $$Q = It. \qquad \text{(Definición de I)}$$

[2] $$I = \frac{E}{R}, \qquad \text{(Ley de Ohm)}$$

[3] $$W = I^2 Rt, \qquad \text{(Ley de Joule).}$$

En estas ecuaciones, t representa el tiempo y W el trabajo. De manera que tres de esas magnitudes pueden expresarse en función de la cuarta, y bastará tener una ecuación entre una de ellas y la unidad absoluta para poder calcular todas las magnitudes eléctricas en unidades absolutas. El conjunto de estas medidas constituirá un *sistema de unidades eléctricas absolutas*.

No existe relación *directa* entre una de las magnitudes eléctricas y las magnitudes que se han tomado como unidades absolutas, esto es, el tiempo, el espacio y la masa mecánica ; pero hay numerosas relaciones entre las magnitudes eléctricas y la mecánicas. Así, la ley de Coulomb y las de Ampère establecen un lazo entre la fuerza mecánica y la *masa eléctrica* ó entre aquélla y la *intensidad eléctrica*. Pero como se puede expresar la fuerza en función de la masa *mecánica* y de la aceleración, se ve que en definitiva es posible valorar las magnitudes eléctricas en unidades absolutas de C. G. S.

Si se escoge la ley de Coulomb para relacionar las magnitudes eléctricas con las unidades absolutas, se constituirá el sistema de las unidades eléctricas absolutas llamado *sistema electrostático*. Si se elige la ley de las acciones electrodinámicas expresada por la *fórmula de Ampère*, se constituirá el *sistema electrodinámico*. Por fin, si se prefiere la ley de las acciones electromagnéticas expresada en la *fórmula de Laplace*, resultará constituído el *sistema electromagnético* de las unidades eléctricas absolutas.

Este último es el que propuso en 1852 la Asociación Británica para el adelanto de las ciencias, el que adoptó en 1865 la sociedad Real de Londres, y que fué precisado y consagrado definitivamente en 1881 por el Congreso de Electricistas.

972. **Unidades absolutas C. G. S. electromagnéticas.** — Este sistema de unidades queda definido por la fórmula de Laplace, que enlaza las magnitudes eléctricas y magnéticas con las mecánicas.

1°. *Unidad de magnetismo.* — Es la cantidad de magnetismo que ejerce sobre una cantidad igual, colocada á 1 centímetro, una fuerza igual á una dina.

Sea Q esta unidad. Según la ley de Coulomb se tiene (representando por F y por L las unidades absolutas de fuerza y de longitud),

$$F = \frac{Q^2}{L^2};$$

de donde se deduce $Q = L\sqrt{F}$.

Sustituyendo F por su dimensión, se tendrá

$$Q = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T}.$$

Tal es la *dimensión* de la unidad de magnetismo

2°. *Unidad del campo magnético.* — Es el campo magnético en que la unidad de magnetismo experimenta una atracción ó una repulsión igual á una dina.

Sea H esta unidad. Según la ley de Coulomb, se tiene $F = HQ$; de donde se deduce

$$H = \frac{F}{Q}$$

Sustituyendo F y Q por sus dimensiones, se tendrá la dimensión del campo magnético, que es

$$H = \frac{M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}}.$$

3°. *Unidad de momento magnético.* — Este es el momento de un imán de longitud igual á 1 centímetro y cada uno de cuyos polos contiene la unidad de magnetismo. Sea J esta unidad. Por definición se tiene $J = QL$. Sustituyendo Q y L por sus dimensiones, se tiene la dimensión de J, que es

$$J = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}}}{T}.$$

4°. *Unidad de intensidad de corriente.* — Es una corriente de intensidad tal que una longitud de un centímetro de ella, que describa un círculo de radio igual á 1 centímetro, ejerce en el centro de este círculo, sobre la unidad de magnetismo, una fuerza igual á una dina.

Sea I la dimensión, se tiene

$$I = \frac{F}{HL} = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}}{T}.$$

5°. *Unidad de cantidad de electricidad.* — Esta es la cantidad de electricidad que pasa en un segundo por la sección de un conductor recorrido por la unidad de la corriente.

Dimensión $= A = IT = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$.

6°. *Unidad de resistencia.* — Esta es la de un conductor en que la unidad de corriente gaste (en forma de calor) un erg en un segundo.

Dimensión $= R = \frac{W}{I^2T} = \frac{L}{T}$. Debe observarse que *esta dimensión es igual á la de la velocidad.*

7°. *Unidad de fuerza electromotora ó de diferencia de potencial.* — Esta es la que comunica la unidad de energía á la unidad de electricidad

Dimensión $= E = IR = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}}}{T^2}$.

8°. *Unidad de capacidad.* — Esta es la de un condensador cuyas armaduras estuvieran cargadas de la unidad de electricidad para una diferencia de potencial igual á la unidad.

Dimensión $= C = \frac{A}{E} = \frac{T^2}{L}$.

973. **Unidades electromagnéticas secundarias.** — Varias de estas unidades absolutas son de uso muy incómodo en la práctica, por exceso ó defecto de magnitud respecto de las cantidades eléctricas que ordinariamente se trata de medir. Así es que se las ha reemplazado en la práctica por unidades secundarias, múltiplos ó submúltiplos suyos [1].

1. Ya hemos definido estas unidades prácticas, á medida que se hacía necesario su uso. Para mayor claridad resumiremos aquí todas esas nociones en un mismo epígrafe.

1°. *Unidad secundaria de intensidad de corriente.* — Es igual á $\frac{1}{10}$ de unidad absoluta ; llámasela *ampère.*

Un galvanómetro de una sola aguja y de escasa sensibilidad, puede ser graduado en miliampères.

2°. *Unidad secundaria de cantidad de electricidad.* — Es igual á $\frac{1}{10}$ de unidad absoluta ; se la llama *coulomb.*

Según M. Mascart, la unidad absoluta de electricidad es capaz de descomponer, 0,9373 mmg de agua en un segundo.

3°. *Unidad secundaria de resistencia.* — Es igual á 10^9 unidades absolutas : llámasela *ohm.*

Hemos visto que esta unidad secundaria se ha realizado materialmente, esto es, que se ha podido construir un *ohm-tipo*, como se ha hecho un *metro-tipo.*

Habiendo resuelto el Congreso de Electricistas que se adoptaría el tipo de resistencia en columna de mercurio á 0° y de sección igual á 1 m², algunos experimentos exactos han probado que la longitud de esta columna es sensiblemente igual á 106 cm.

El *ohm-tipo* que determinó primitivamente la Asociación británica era demasiado pequeño : se diferencia 0,010 próximamente del ohm teórico.

La *unidad de resistencia Siemens* (que no es sino la antigua unidad de Pouillet) vale próximamente 0,943 del ohm teórico.

Se necesitan poco más ó menos 50 m de un alambre de cobre de 1 mm de diámetro para constituir un ohm.

La antigua unidad de resistencia de los telégrafos franceses, que era de 1 kilómetro de alambre de hierro de 4 mm. de diámetro, vale próximamente 10 ohms.

Un elemento Bunsen de dimensión media tiene una resistencia de 0,15 de ohm próximamente, y un elemento Becquerel de dimensión media una resistencia de 0,85 de ohm.

4°. *Unidad secundaria de fuerza electromotora ó de diferencia de potencial.* — Es igual á 10^8 unidades absolutas : llámasela *volt.*

Un elemento Volta ordinario, formado de zinc, cobre, sulfato de cobre, sulfato de zinc, tiene una fuerza electromotora sensiblemente igual á 1 volt.

Un elemento Becquerel formado de cobre, sulfato de cobre, sulfato de zinc y zinc amalgamado, tiene una fuerza electromotora que varía entre 1,09 y 1,14 volt.

La fuerza electromotora del elemento Latimer Clark, uno de los más constantes entre los voltaicos, tiene como valor 1,457 volt.

5°. *Unidad secundaria de capacidad eléctrica.* — Es igual á $\frac{1}{10^9}$ de unidad absoluta : se la llama *farad.*

Según la fórmula fundamental de los condensadores $Q = CV$, se ve que un condensador de 1 farad se carga con *un coulomb*, en cada una de sus armaduras para una diferencia de potencial de *un volt.*

Observación. — La unidad absoluta de capacidad electromagnética es enorme.

Aun el farad es demasiado grande en la práctica. Para este género de medidas se construyen *condensadores-tipos* que dan el microfarad y los submúltiplos del microfarad.

Una batería eléctrica de 10 jarras que tengan un desarrollo superficial de 1m² y un vidrio de grueso de 1 mm, mide $\frac{1}{55}$ microfarad de capacidad.

CAPÍTULO VII

EFECTOS FÍSICOS DE LAS CORRIENTES.

—

IMANTACIÓN POR LAS CORRIENTES, ELECTROIMANES.

974. **Imantación por las corrientes.** — Dada la influencia que las corrientes ejercen sobre los imanes, es natural pensar que también actuarán sobre las sustancias magnéticas, de manera que las imanten, mediante la orientación de las corrientes de Ampère. Arago descubrió efectivamente que sumergiendo un alambre de hierro recorrido por una corriente en limaduras del mismo metal, éstas se pegan en abundancia al alambre, cayendo así que la corriente cesa, mientras que la acción es nula sobre la limadura de cualquier otro metal no magnético.

La acción de las corrientes sobre las sustancias magnéticas es sobre todo sensible cuando se emplea el procedimiento de Ampère. Arróllase en hélice un alambre de cobre alrededor de un tubo de vidrio, y se coloca en éste una barra de acero no imantada. Entonces basta que una corriente atraviese el alambre, aun instantáneamente, para que la barra quede fuertemente imantada.

Si, en vez de una corriente de pila se hace pasar por el alambre una descarga de botella de Leyden, se observa también que la barra queda imantada.

975. **Procedimiento de imantación.** — 1°. *Caso del acero.* — En general la barra de acero se coloca en el eje de un tubo de vidrio encima del cual se arrolla el alambre conductor de la corriente. La aplicación del alambre puede efectuarse de izquierda á derecha por encima

Fig. 877.

Fig. 878.

y entonces se tiene una *hélice dextrorsum* (fig. 877); si se hace de izquierda á derecha por debajo, resulta una *hélice sinistrorsum* (fig. 878). En la primera, el polo sur de la barra se encuentra siempre en la extremidad por donde entra le corriente; lo contrario ocurre con la hélice sinistrorsum.

Por lo demás, para imantar una barra de acero con ayuda de una

corriente, no es necesario colocarla en un tubo. Basta rodearla, en toda la longitud, con las espiras de un alambre de cobre aislado, y después hacer pasar por él la corriente.

De esta manera, por acción de una corriente poderosa, una barra de acero adquiere imantación muy grande, que persiste después del paso de la corriente, aunque disminuyendo lentamente hasta quedar la barra en estado de saturación estable.

2º. *Caso del hierro dulce.* — Si en las hélices antes nombradas se coloca una barra de hierro dulce, así que una corriente recorre el alambre, la barra se imanta fuertemente, y permanece imantada todo el tiempo que la corriente pasa; pero así que ésta se interrumpe, desaparece toda imantación, lo cual se debe á que la fuerza coercitiva del hierro dulce es nula. Sin embargo, cuando el hierro no es enteramente dulce, quiere decir, puro, conserva rastros de imantación.

976. *Electroimanes.* — Llámase *electroimanes* á unas barras de hierro dulce en que se arrolla gran número de veces, en hélices superpuestas, un alambre de cobre perfectamente aislado. Estas hélices superpuestas son alternativamente dextrorsum y sinistrorsum: pero como la corriente se propaga en ellas en sentidos contrarios dos á dos, sus efectos se suman para desarrollar respectivamente un polo norte en un extremo del carrete magnetizante y uno sud en el otro.

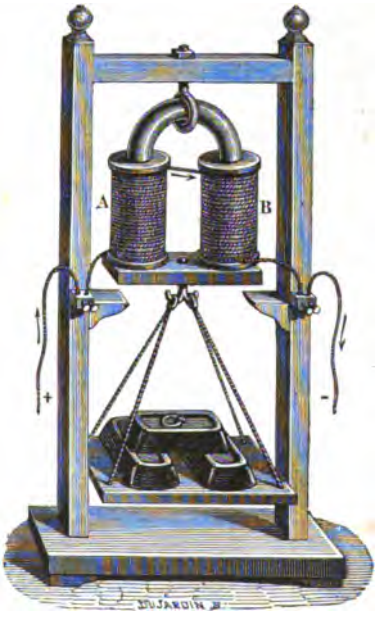


Fig. 879.

Cuando los electroimanes son rectilíneos, se arrolla el alambre, sea en toda la longitud de las barras, sea en las extremidades únicamente, en dos carretes distintos, yendo el alambre de una á otra y arrollándose en el mismo sentido. Si las barras se encorvan á modo de herradura (fig. 879), se arrolla el alambre únicamente en las dos ramas, en dos carretes A y B, y se pasa de una rama á otra, según indica la figura, de modo que cada carrete sea continuación del otro: con esta condición es como se forman en los extremos dos polos de nombres contrarios.

También se fabrican electroimanes de tres pedazos: dos carretes,

uno destrorsum, el otro sinistrorsum, se arrollan respectivamente en torno de un núcleo de hierro dulce, y una armadura de metal pone en comunicación los dos núcleos por medio de fuertes tornillos. Estos electroimanes son más fáciles de hacer que los de una sola pieza y son tan poderosos como ellos.

977. **Magnetismo remanente.** — Llámase *magnetismo remanente* á una imantación escasa que conserva con frecuencia el hierro de los electroimanes después de la interrupción de la corriente.

Este fenómeno se observa ordinariamente en un hierro que no está perfectamente puro; pues entonces el metal está dotado de cierta fuerza coercitiva que retiene la imantación después del paso de la corriente. Sin embargo, el magnetismo remanente se manifiesta también en el caso de un hierro perfectamente puro, cuando el electroimán está en contacto con su armadura. En este caso, como la armadura está imantada por influencia, sus dos polos, en el momento de la ruptura de la corriente, reaccionan sobre el hierro del electroimán para mantener en ellos dos polos de nombres contrarios : de ahí una imantación que persiste luego mientras dura el contacto y cesa con él.

En los aparatos en que electroimanes actúan por intermitencia sobre su armadura, el magnetismo remanente impide que ésta se desprenda. De ahí resulta un funcionamiento irregular, que se evita interponiendo una hoja delgada, sea de papel, sea de otra sustancia inerte, entre los electroimanes y sus armaduras.

978. **Definiciones fundamentales : Permeabilidad magnética. —Inducción específica. — Campo magnetizante. — Fuerza magnetomotora. — Reluctancia. — Circuito magnético. — Ampère vuelta. — Histeresis.** — Consideremos un carrete infinitamente largo, que tenga n espiras por centímetro ; demuéstrase que, dada una corriente de intensidad I, que circula en el carrete, el campo magnético producido tiene como intensidad $4\pi nI$ y que está dirigido paralelamente al eje del carrete.

Permeabilidad magnética. — Introduzcamos en el carrete un cilindro del mismo diámetro, de una sustancia magnética, y sea Φ_1 el flujo que atraviesa su sección S. Antes de la introducción del cilindro, este flujo tenía como valor

$$\Phi_0 = 4\pi nIS\,; \qquad \text{después pasa á ser} \qquad \Phi_1 = 4\pi nIS\mu\,; \qquad [1]$$

el coeficiente μ se denomina *permeabilidad* magnética de la sustancia.

Inducción específica y campo magnetizante. — Puede escribirse

$$[1] \qquad 4\pi nI = \frac{\Phi_1}{S} \cdot \frac{1}{\mu}.$$

Llámase *inducción específica* al cociente $\frac{\Phi_1}{S}$, y se le designa de ordinario por la letra B. $4\pi nI$ es el *campo magnetizante.* Designasele por H.

Fuerza magnetomotora y reluctancia. — Si l es la longitud del cilindro introducido, se tiene

$$N = nl.$$

siendo N el número de vueltas del circuito que cubre la longitud l ; puede en consecuencia escribirse la relación [1]

$$[2] \qquad 4\pi NI = \frac{1}{\mu}\,\frac{l}{S} \cdot \Phi_1\,;$$

el producto 4π NI se llama *fuerza magnetomotora* del flujo Φ_1 en el cilindro.

$\frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$ es la *resistencia magnética* ó *reluctancia*, del cilindro.

Circuito magnético. — Si se compara el flujo Φ_1 con la intensidad de una corriente eléctrica, la permeabilidad μ con la conductibilidad específica y la fuerza magnetomotora con la fuerza electromotora, se ve que la fórmula [2] es análoga á la que expresa la ley de Ohm. Para completar este paralelismo, se llama *circuito magnético* al camino seguido por el flujo Φ_1. La resistencia de los medios que lo constituyen es igual á $\Sigma \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}$ y la fuerza magnetomotora del flujo tiene como valor $\Sigma\, 4\pi$ NI.

Ampère-vuelta. — Si I se expresa en ampères, el producto NI se llama *ampère-vuelta*. La fuerza magneto-motora es exclusivamente función de los ampéres-vueltas.

Si se conocen μ, l, S y el flujo Φ_1 que se ha de producir, la fórmula [2] da á conocer el número de ampères-vueltas que precisa emplear. Una sola espira recorrida por una corriente de 20 ampères, produce el mismo flujo que 20 vueltas para una corriente de 1 ampère.

Histeresis ó retraso en la imantación. — El valor de μ varía con el campo magnetizante H : está dado por curvas ó tablas obtenidas experimentalmente. Hay más : la inducción no tiene el mismo valor para uno idéntico de H, según que se la determine considerando el aumento ó por la disminución del campo magnetizante. Yendo de — H á + H y volviendo á — H, se obtiene pues un ciclo de imantación ; la inducción específica B tiene valor mayor para un mismo valor del campo magnetizante yendo de + H á — H que en el sentido contrario. Ewing dió á este fenómeno el nombre de *histeresis* ó de *retraso en la imantación*. Es correlativo de una pérdida de energía.

979. **Cálculo de un electroimán.** — Es posible calcular, por medio de la fórmula [2], electroimanes que deban satisfacer á condiciones dadas y á la de las máquinas-dinamos. Por ejemplo, si se desea obtener una inducción específica B impuesta de antemano en un núcleo de sección S, de permeabilidad μ y de longitud l, habrá que darle un número de ampères-vueltas NI indicado por la ecuación

$$\mathrm{NI} = \frac{1}{4\pi}\,\frac{1}{\mu}\,\frac{l}{S}\,\mathrm{BS} = \frac{\mathrm{B}l}{4\pi\mu}.$$

Si se da la fuerza de alcance Mg habrá que empezar por calcular la inducción específica correspondiente B por la igualdad

$$\mathrm{M}g = \frac{\mathrm{B}^2\mathrm{S}}{8\pi}.$$ [1]

980. **Sustancias diamagnéticas y sustancias paramagnéticas.** — La distinción entre las sustancias paramagnéticas y diamagnéticas no fué puesta en claro de manera perfecta hasta que lo hizo Faraday en 1847, por medio de sus poderosos electroimanes.

Este físico llamó *dirección axial* (de *axis*, eje) á la recta que une los dos polos del electroimán, y *dirección ecuatorial* á la perpendicular á la misma línea. Observó que el número de sustancias diamagnéticas es mayor que el de las magnéticas.

Las primeras son el bismuto, el plomo, el antimonio, el zinc, el cobre, el cristal de roca, el vidrio, la sal marina, el yeso, el carbón, el azufre, y en general las sustancias orgánicas, como las resinas, el azúcar, la madera, la carne de los animales. Las sustancias magnéticas son el hierro, el nickel, el cobalto, el cromo y la mayor parte de los metales. Hoy puede admitirse que no existe sustancia alguna sobre la cual no ejerzan acción los imanes poderosos, sea en un sentido ó en otro.

1. Véase Joubert, *Traité élémentaire d'électricité*.

CAPÍTULO VIII

MEDIDA DE LA INTENSIDAD DE LAS CORRIENTES. — GALVANÓMETROS Y BRÚJULAS.

981. **Métodos é instrumentos de medida.** — 1°. *Método electroquímico.* — Hemos indicado un primer método de medida, que se debe á Davy. Fúndase en la comparación de los efectos químicos de las corrientes. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un compuesto binario ó ternario, se sabe que lo descompone en sus elementos : los electronegativos se depositan en el eléctrodo *positivo*, mientras que el elemento electropositivo se deposita en el eléctrodo *negativo*. En ambos casos, la cantidad de electrolito descompuesta por una misma corriente es, — dada igualdad de circunstancias, — *proporcional á la cantidad de electricidad* que atraviesa el electrolito.

Ahora bien, la intensidad de una corriente está definida por la cantidad de electricidad que pasa, en la unidad de tiempo, por una sección cualquiera del circuito. Como la experencia ha demostrado que el peso de hidrógeno desprendido en un voltámetro de agua, es proporcional á esta cantidad de electricidad, debe deducirse de ahí que *la intensidad de una corriente es proporcional al peso* de hidrógeno que pone en libertad, ó *al peso* de cualquier otro electrolito que precipite *en un segundo*.

Aplicación del método electroquímico. — Llamemos e al equivalente en pesode l elemento depositado, referido al hidrógeno y *expresado en gramos* : sábese que un coulomb pone en libertad un peso $p_1 = \frac{e}{96\,600}$ de este cuerpo.

Supongamos que se haga pasar la corriente desconocida, durante t segundos, por este electrolito y sea p el peso depositado. El número de coulombs Q que corresponden al peso p está dado por la fórmula

$$Q = \frac{p}{p_1} = \frac{96\,600\,p}{e}.$$

Por lo demás, entre la intensidad i buscada y la cantidad Q se tiene la ecuación de definición

$$Q = it, \qquad \text{de donde} \qquad i = \frac{96\,600\,p}{et}.$$

Observación. — 1°. Podría emplearse el voltámetro de agua para efectuar estas medidas; pero como los elementos del agua son gaseosos y difíciles de recoger, es preferible tomar como electrolito una solución de una sal metálica, como el sulfato de cobre ó el nitrato de plata : entonces se pesa con facilidad el metal depositado durante cierto tiempo.

1 coulomb deposita : 0,00033 g de cobre, 0,001 118 g de plata, 0,00034 g de zinc.

El volumen de hidrógeno puesto en libertad por un coulomb, medido á 0° y 76 cm de presión, ocupa un volumen de 0,1155 centímetro cúbico.

2°. *Coulombmetro de Edison.* — En realidad, la medida da sencillamente á conocer la intensidad media de la corriente, pero no indica sus variaciones.

Este método ha sido aplicado por Edison á la construcción de un *contador electroquímico* de cantidad de electricidad ó *coulombmetro*,

2°. *Método electromagnético.* — Un segundo método de medida, más cómodo que el anterior, se funda en la comparación de los efectos electromagnéticos de las corrientes. Aplícasele por medio de instrumentos especiales llamados *galvanómetros* y *brújulas*. La corriente eléctrica penetra en el instrumento, donde actúa sobre una aguja imantada que se desvía más ó menos. El sentido de la desviación depende del de la corriente, y la magnitud de la desviación es una función de la intensidad.

En los galvanómetros llamados *relativos*, esta función es muy complicada y hay que determinarla experimentalmente. La intensidad I se deduce de la desviación observada α por medio de una *fórmula empírica* ó, lo que equivale á lo mismo, de una *tabla de graduación*. En general, los galvanómetros de este género no se usan sino en medidas *relativas:* entonces sólo se les pide *sensibilidad*.

Con los galvanométros llamados *absolutos* ó *brújulas*, únicos que sirven para las medidas absolutas, la desviación de la aguja es una función de la intensidad, que se puede calcular.

982. **Galvanómetro ordinario.** — 1°. *Principio.* — El *galvanómetro*, llamado también *multiplicador* y *reómetro*, fué construído por Schweigger, como aplicación del descubrimiento de Œrsted. La desviación que la corriente imprime en él á una aguja imantada indica la existencia de las corrientes ; el sentido de esta desviación da á conocer su dirección, y el ángulo de separación expresa la intensidad.

2°. *Construcción.* — La acción directora de la tierra, que tiende á mantener la aguja imantada en el meridiano magnético, es una fuerza opuesta que disminuye la desviación de la aguja. Importa, pues al mismo tiempo multiplicar la acción de las corrientes y disminuir la de la tierra.

Multiplicador de Schweigger. — Schweigger tuvo la idea de doblar varias veces el alambre conductor de manera que formase un circuito múltiple, rectangular y vertical, en cuyo centro está suspendida la

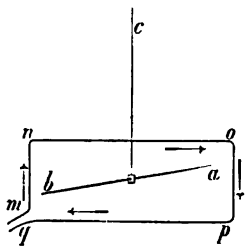


Fig. 880.

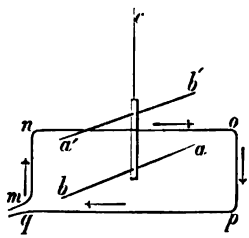


Fig. 881

aguja por medio de un hilo de capullo de seda (fig. 880). Si se aplica á este caso la regla de Ampère, se reconoce fácilmente que cuando una corriente recorre el circuito *mnopq*, las cuatro partes *mn*, *no*, *op*

y *pq* actúan en el mismo sentido para hacer desviar el polo *a* por detrás del plano *mnop*, y el polo *b* hacia adelante. Arrollando el alambre en el plano vertical de la aguja se ha *multiplicado* por consiguiente la acción de la corriente: de ahí el nombre de *multiplicador* que se da á este aparato. Esta multiplicación no puede aumentar con el número de vueltas *sino hasta cierto límite;* pues por una parte la intensidad de la corriente se debilita á medida que aumenta la longitud y, por tanto, la resistencia del circuito que recorre; y por otra, la acción de las espiras disminuye á medida que se alejan de la aguja.

Aguja astática de Nobili. — Nobili hizo actuar el circuito, no sobre una sola aguja, sino sobre un sistema astático (778) de dos agujas (fig. 881), una interior y otra exterior al alambre, y unidas invariablemente una con otra. La aguja interior *ab* es influída por el circuito *mnopq*, según hemos explicado antes; pero por lo que es de *a'b'*, la parte *no* tiende á volver el polo *a'* hacia delante mientras que las tres porciones *mn*, *op* y *pq* tienden á impulsarlo hacia atrás. Predomina la acción de *no*, por causa de la menor distancia, de modo que en suma, el efecto de la corriente aumenta con esa acción; pero la ventaja principal del sistema astático reside en una disminución notable de la acción directora de la tierra. Puede decirse que si el sistema fuera rigurosamente astático, quedaría sustraído por completo á la acción terrestre y se desviaría 90° bajo la influencia de las menores corrientes. En la práctica se necesita que el sistema sea imperfectamente astático, de modo que la tierra ejerce una acción antagónica, que aumenta con la desviación, y acaba por anular la acción de la corriente en un azimut α diferente de 90°. Por lo demás, esta diferencia de las agujas, que puede llegar á ser tan pequeña como se quiere, no daña á la sensibilidad del instrumento.

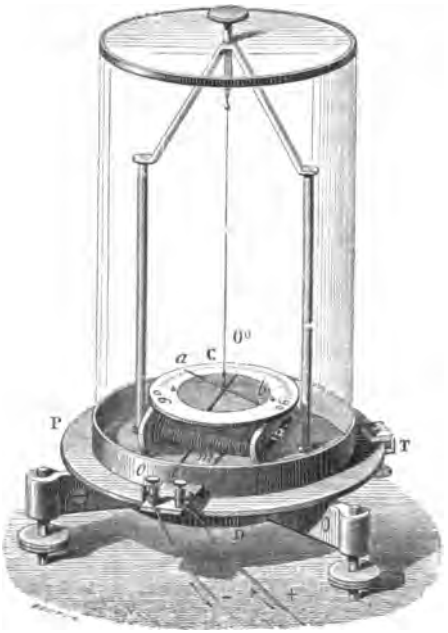


Fig. 882.

3°. *Descripción* (modelo Ruhmkorff). — El instrumento (fig. 882)

está contenido en una urna de vidrio, que lo sustrae á las agitaciones del aire ambiente, así como á la oxidación. La peana es un grueso disco de latón D, sostenido por tres tornillos de nivel; encima hay un platillo giratorio P, del mismo metal, donde se fija un marco de cobre rojo, de ancho casi igual á la longitud de las agujas. En este marco se arrolla multitud de veces un alambre de cobre rojo *m*, perfectamente aislado, cuyos extremos llegan á dos topes *i* y *o*, destinados á recibir los reóforos de la corriente. El marco sostiene un círculo graduado C, de cobre rojo, hendido según un diámetro paralelo al modo de estar arrollado el alambre: á esa hendidura corresponde el cero de la graduación, que va por ambos lados desde 0° á 90°. Por esa hendidura se introduce en el multiplicador el sistema astático de las dos agujas, que está suspendido por medio de un hilo de capullo de seda, atado de un tornillo de llamada que atraviesa una tuerca montada sobre dos columnas paralelamente dispuestas á ambos lados del marco. La aguja *a'b'*, principalmente influída por la corriente, se encuentra dentro del circuito, y la aguja *ab*, que se mueve encima del circuito, indica las desviaciones.

4°. *Arreglo.* — Empiézase por mover los tornillos de nivel hasta lograr que el hilo de capullo pase por el centro sin frotar contra los bordes de la hendidura; después por medio del tornillo de llamada, se levanta ó se baja el sistema astático hasta que gira libremente en el circuito. Luego se orienta en el meridiano magnético el diámetro del cero. Con tal fin se hace dar vuelta al platillo P sobre su peana D, hasta que la extremidad *a* de la aguja *ab* corresponda al cero: entonces las agujas son paralelas á los alambres del marco. Acábase por fijar el instrumento, comprimiendo por medio de un tornillo de presión una pinza T adaptada á la peana.

Observaciones. — 1°. En el instante en que empieza á pasar la corriente, las agujas, bruscamente apartadas de su posición de equilibrio, tienden á dar varias vueltas sobre sí mismas. Evítase esta rotación fijando, frente á las divisiones 90, dos pequeños topes contra los cuales choca la aguja superior.

2°. Se atenúan las oscilaciones del sistema gracias á la influencia del cuadrante y del marco de cobre rojo. En efecto, ya veremos que las oscilaciones de la aguja imantada dan origen en este metal á corrientes llamadas *de inducción* que, al reaccionar sobre ella, tienden á pararla (*magnetismo de Arago*).

3°. No obstante los cuidados que se ponen en la construcción de este aparato, presenta varios defectos que casi han hecho abandonar su uso, entre otros la debilitación gradual aunque pequeña de la aguja, la falta de ley que exprese la relación entre las intensidades y las desviaciones observadas y las dificultades de su graduación.

983. **Galvanómetro de Thomson.** — 1er *modelo.* — Lord Kelvin (Sir W. Thomson) construyó para medir con precisión las corrientes pequeñas un galvanómetro de sensibilidad variable, que se diferencia del anterior:

1°. en el principio del sistema astático; 2°. en la forma del multiplicador.

Hemos visto anteriormente que podía hacerse astática una aguja imantada colocando convenientemente en sus inmediaciones una barra imantada. Este es el procedimiento usado por Thomson. La aguja imantada está constituída por varias otras solidarias de 5 á 6 milímetros de largo (así se obtiene para el mismo peso el mayor momento magnético); está suspendida por medio de uno ó varios hilos sin torcer en el centro del multiplicador. Este se encuentra dentro de una urna cilíndrica, sobre la cual se alza un vástago vertical : en este vástago se puede mover y orientar la barra directora, debilitando así ó reforzando según convenga la acción terrestre, y haciendo variar la astaticidad de la aguja y la sensibilidad del instrumento.

Cuanto al multiplicador (fig. 883), su forma es bastante complicada, porque se la ha calculado de manera que produzca sobre la aguja el *máximum de efecto específico* (efecto por unidad de longitud del hilo).

2°. *modelo.* — En otro modelo (fig. 884), usa lord Kelvin un sistema astático. Cada aguja está rodeada por un multiplicador. Según que la corriente pasa por los multiplicadores en sentidos contrarios ó en el mismo sentido, así se suman ó se restan las acciones que ejerce sobre las agujas [1].

Los dos carretes principales B y B', cuyos extremos terminan en los topes *b* por

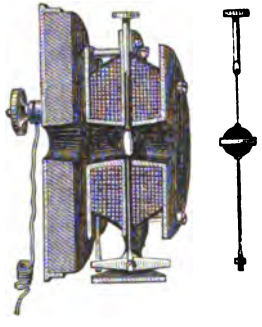


Fig. 883.

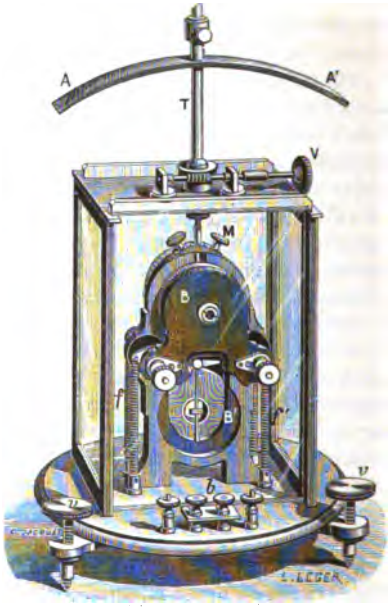


Fig. 884.

medio de los alambres, arrollados en forma de morcilla *f*, *f'*, están formados á su vez por dos carretes aplicados uno contra otro y fijos en la armadura del aparato por medio de tornillos de compresión M. Puede efectuarse el agrupamiento de estos cuatro carretes de modo que la resistencia del galvanómetro sea proporcional á la índole de las medidas que van á efectuar. El imán compensador A A', móvil á lo largo del vástago T, y que se puede por otra parte hacer girar lentamente mediante el tornillo V, permite no sólo hacer variar la sensibilidad, sino también orientar las agujas paralelamente al plano de las espiras de su multiplicador. Una lámina delgada de mica ó de aluminio fija en la armadura sirve para atenuar las oscilaciones : esa lámina sostiene un pequeño espejo, indicador óptico de las desviaciones.

Observación. — *Sensibilidad.* — Los galvanómetros de lord Kelvin son los que

1. En este último caso se dice que el instrumento está *montado en diferencial.*

permiten alcanzar el máximum de sensibilidad en la medida de la intensidad de las corrientes. Es fácil obtener desviaciones de la *mancha* (ó punto luminoso) iguales á 1 ó 2 cm sobre una escala situada á la distancia de un metro del galvanómetro, cuando pasa por su circuito una corriente de *un milésimo de microampère*. La resistencia total de los carretes de un Thomson es ordinariamente de unos 10 000 ohms.

984. **Galvanómetro aperiódico Deprez-d'Arsonval.** — En el galvanómetro Deprez-d'Arsonval (fig. 885) el órgano móvil está formado por un multiplicador rectangular M, situado en el campo de un imán fijo NS. El par antagónico está tomado de la torsión del alambre que sirve al mismo tiempo para suspender el marco y conducir la corriente.

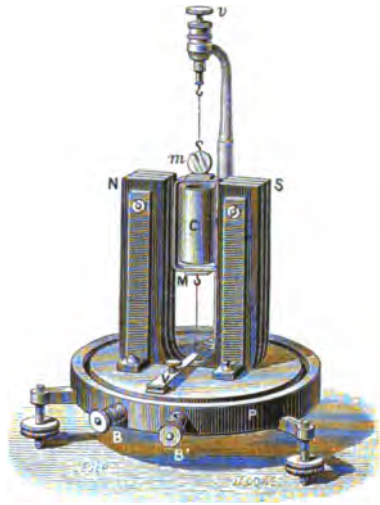


Fig. 885.

Dentro del marco y fijo se encuentra un cilindro de hierro dulce C : este es el *amortizador*. Las corrientes inducidas en su masa por el movimiento del multiplicador son bastante intensas para suprimir toda oscilación del cuadro y hacer completamente *aperiódico* el galvanómetro. Los topes están en BB'; los tornillos *v* y V permiten arreglar la posición del marco y del pequeño espejo *m*.

985. **Galvanómetros absolutos : Brújula de las tangentes.**— 1°. *Descripción sumaria y uso.* — Este aparato (fig. 886), inventado por Pouillet, permite medir directamente las intensidades de corrientes en *unidades absolutas*.

Fig. 886.

Compónese esencialmente de una aguja imantada móvil en un plano horizontal. Su eje vertical está colocado en el centro de un marco circular de madera, sobre el cual se arrolla un alambre metálico, ó de un círculo de cobre.

Llévase el marco al meridiano magnético, de manera que el marco y la aguja se encuentren en un mismo plano. Entonces se da paso á la corriente. La aguja imantada, solicitada por un par perpendicular á su dirección, se desvía de su posición de equilibrio. Pero á medida que se va alejando de ella, el efecto de la componente horizontal del par terrestre crece y, como la acción de la corriente permanece constante, llega ne-

cesariamente un momento en que estas dos fuerzas contrarias se equilibran. En ese instante la aguja imantada permanece en equilibrio en un azimut α.

2°. *Ecuación de equilibrio.* — La aguja es muy corta relativamente al radio del marco. Cuando se satisface esta condición, demuéstrase por medio de las fórmulas de Ampère [1] que las acciones de una corriente que circula en el alambre se reducen á dos fuerzas F, iguales y contrarias, aplicadas en los dos polos de la aguja y perpendiculares al plano del marco: tiénese

$$F = \mu H_1 \quad \text{con} \quad H_1 = \frac{2\pi i}{R}$$

(siendo μ la masa magnética de los polos; i, la intensidad de la corriente; R, el radio del marco).

Sea $a'b'$ la posición de equilibrio que toma la aguja bajo las acciones simultáneas $(F_1 - F)$ y $(T_1 - T)$ de la corriente y de la tierra (fig. 887).

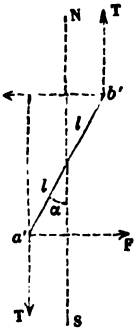


Fig. 887.

Los momentos de estos pares son: $T.2l \operatorname{sen} \alpha$ y $F.2l \cos \alpha$. Basta expresar que estos momentos son iguales y de signo contrario. Tiénese

$$T.\,2\,l \operatorname{sen} \alpha - F.\,2\,l \cos \alpha = 0;$$

de donde, reemplazando T por su valor μH (siendo H la componente horizontal del campo terrestre) y F por su valor $n\mu H_1$ (siendo n el número de vueltas del alambre del circuito),

$$\mu H.2\,l \operatorname{sen} \alpha - n\mu H_1.2\,l \cos \alpha = 0,$$

y si aquí se observa que se tiene $M = 2l\mu$ y $H_1 = \frac{2\pi i}{R}$, resulta

$$\text{tangente } \alpha = \frac{2\pi n}{R}\,\frac{i}{H} \quad \text{ó también} \quad i = H\,\frac{R}{2\pi n}\,\text{tang } \alpha$$

$\frac{2\pi n}{R}$ es la *constante del galvanómetro*: es el campo producido en el centro O por la unidad de corriente que cruza el marco Designándola por g, se puede escribir finalmente

$$i = \frac{H}{g}\,\text{tang } \alpha:$$

tal es la fórmula de la brújula de las tangentes.

Observaciones. — 1°. *Medidas relativas.* — Una segunda corriente i' daría

$$i' = \frac{H}{g}\,\text{tang } \alpha', \quad \text{de donde} \quad \frac{i}{i'} = \frac{\text{tang } \alpha}{\text{tang } \alpha'}$$

Esta ecuación de equilibrio supone que la acción electromagnética de la corriente ha permanecido perpendicular al marco, es decir, al meridiano magnético, aunque la aguja haya salido de este plano. Esta hipótesis es legítima si el ángulo α es muy pequeño y si el radio del marco es muy grande relativamente á la aguja: de donde se deduce la necesidad de tener una aguja *corta* y un marco *ancho*.

Fig. 888.

986. **Ampèremetros. — Tipo Deprez-Carpentier.** — Los galvanómetros industriales se llaman *ampèremetros*. Gradúascles por comparación con un galvanómetro que sirva de tipo. El de MM. Deprez y Carpentier (fig. 888) comprende un imán móvil, colocado

1. Véase este cálculo en los problemas.

dentro de los carretes B y B', dispuestos en serie, y orientado por un imán doble encorvado NN fijo. El eje del carrete BB' está inclinado sobre la línea de los polos del doble imán, y la corriente es dirigida en él de modo que vuelva á colocar la aguja paralelamente á las espiras del alambre. El par que se desvía crece entonces, como el par director, con el ángulo de la aguja, y *sensiblemente* hay proporcionalidad entre éste y la corriente. Una aguja ligera *a*, solidaria del imán interior, se mueve frente á una graduación en ampères. Los topes del aparato se encuentran en *b* y *b'*.

987. **Electrodinamómetros.** — Una medida de intensidad con los galvanómetros absolutos exige el conocimiento de la componente horizontal del campo terrestre; además no da indicación alguna sobre las corrientes alternas, pues la desviación de la aguja cambia de signo con la corriente. Los *electrodinamómetros* son instrumentos mucho menos sensibles que los galvanómetros; pero la misma corriente pone en acción ahí un carrete fijo y otro móvil dentro de la primera: de ahí resulta que el sentido del movimiento de la aguja es independiente del de la corriente y, según la fórmula de Ampère que, el momento del par motor es proporcional al cuadrado del número que mide la intensidad de la corriente. Puede equilibrarse este par, sea por un par de torsión, sea por el efecto de una suspensión bifiliar, sea sencillamente con un peso, como en el electrodinamómetro de M. Pellat y en el de M. Berget.

988. **Electrodinamómetro Pellat.** — El electrodinamómetro de M. Pellat (fig. 889) se compone esencialmente de un carrete B, horizontal y perpendicular al plano del meridiano. Lo supondremos infinitamente largo y formado por una sola capa

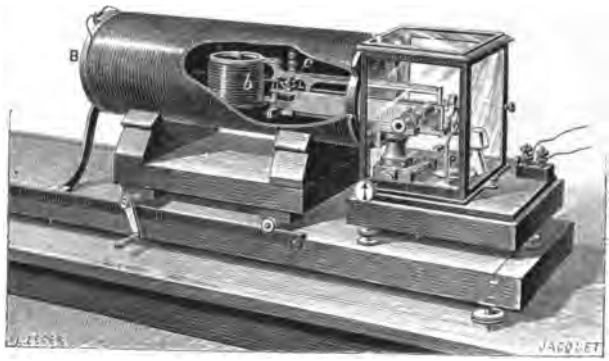


Fig. 889.

de alambre que contiene *n* espiras por unidad de longitud. Una corriente de intensidad *i* que recorre el carrete crea dentro de éste un campo magnético uniforme de intensidad $H_1 = 4\pi ni$.

Un segundo carrete *b*, cuyo eje es vertical, se encuentra en este campo. Cuando ese carrete es cruzado por la corriente *i*, equivale á un imán de momento magnético $M = Si$, siendo S la superficie total abarcada por las espiras del carrete interior. El momento mecánico desarrollado por el campo es MH_1, y es igual á $4\pi nSi^2$.

Supongamos que se mantenga el carrete *b* en equilibrio por medio de un peso *p*t expresado en dinas, colocado en el extremo de un brazo de palanca *d*; tiénese evidentemente la ecuación de equilibrio

$$pd = 4\pi nSi^2,$$

de donde se deduce

$$i = \sqrt{\frac{d}{4\pi nS}}\sqrt{p} = K\sqrt{p},$$

designando por K la *constante* del instrumento, que es $\sqrt{\frac{d}{4\pi n S}}$.

Dispuesto de esta manera, el aparato constituye un *electrodinamómetro absoluto*.

APLICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA : MEDIDAS ELÉCTRICAS.

989. **Shunt de los galvanómetros.** — En las medidas galvanométricas, cada vez que el instrumento es muy sensible y cuando la intensidad de la corriente es bastante grande para descomponerlo, se emplea un aparato especial llamado *shunt*. El shunt permite hacer pasar á voluntad por el galvanómetro una fracción cualquiera de la corriente, ó bien la corriente entera, ó bien suprimirla. Ya hemos expuesto precedentemente su teoría.

Descripción. — Compónese de una serie de tres carretes de alambre conductor, cuyas resistencias son respectivamente iguales á $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ et $\frac{1}{999}$ de la *resistencia del galvananómetro conjugado*. Están contenidos en una caja cilíndrica de metal (fig. 890), cuya tapa es una placa aisladora de ebonita. Seis piezas metálicas, de resistencia despreciable por causa de su grueso, están dispuestas en la placa; encuéntranse aisladas unas de otras por la ebonita, excepto la pieza central CA, que se enlaza metálicamente con la pieza posterior de la derecha. Las tres piezas anteriores pueden ser puestas en comunicación con CA y, por consiguiente, con la pieza posterior de la derecha por medio de clavos metálicos; también se pueden unir á voluntad las dos piezas posteriores. Estas se encuentran provistas de dos topes metálicos : con la de la izquierda están en comunicación los tres carretes, mientras que los otros tres extremos van á terminar separadamente en las tres piezas anteriores marcadas $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$.

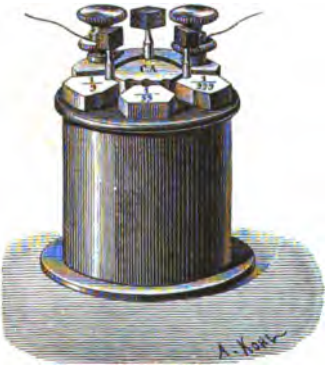


Fig. 890.

Operación. — Los alambres del circuito se atan en los dos topes de la pila. También se fijan ahí los dos reóforos del galvanómetro : el instrumento se coloca entonces en derivación en el circuito.

Si se pone un clavo entre las dos piezas posteriores del shunt y se suprimen todos los demás, toda la corriente pasa por el conjunto de las dos piezas posteriores, cuya resistencia es despreciable, y en el galvanómetro no penetra sino una fracción insensible de ella.

Si por el contrario se suprimiera el clavo, toda la corriente pasaría por el galvanómetro, porque habría una interrupción en la otra derivación.

Por fin, si se pone el clavo entre la pieza CA y la $\frac{1}{9}$, por ejemplo, la corriente pasará entonces por dos circuitos derivados, uno constituído por el galvanómetro, y el otro por el carrete del shunt (de resistencia igual á 1/9 de la del galvanómetro).

Observaciones. — 1°. En las medidas con el galvanómetro pueden considerarse las desviaciones pequeñas como proporcionales á la intensidad de la corriente. La *constante de proporcionalidad* puede ser determinada experimentalmente haciendo pasar una misma corriente por el galvanómetro y por una brújula de las tangentes.

2°. Las lecturas de los pequeños ángulos se efectúan por el método de la reflexión. Si d es el movimiento á lo largo de la regla, D la distancia de ésta al espejo, se tiene

$$2\alpha = \frac{d}{D}, \qquad \text{de donde} \qquad \alpha = \frac{d}{2D}.$$

Para poner siempre un galvanómetro de tres tornillos de nivel en la misma posición, se numeran estos tornillos y se les coloca respectivamente en un agujero, una ranura y un plano fijos en la peana estable que se utiliza.

990. **Comparación de las resistencias.** — Á la medida de las resistencias se aplica el caso llamado *puente de Wheatstone*. Este es el método más cómodo y más usado.

1°. *Principio del método.* — El puente de Wheatstone es una derivación que tiene la forma *esquemática* de un rombo con dos diagonales (fig. 891). La diagonal mayor está fuera del rombo; contiene la pila (ó el contacto electromotor); la pequeña diagonal constituye hablando en propiedad el *puente*.

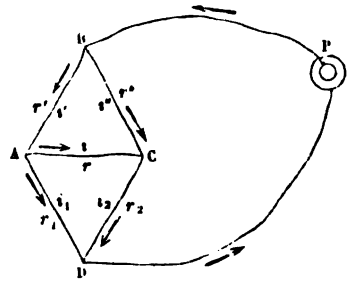


Fig. 891.

La corriente procede del polo positivo de la pila y vuelve á él después de haber recorrido los cinco conductores del rombo, según indican las flechas. Se ve que la corriente debe circular en el *puente* tan bien desde A hacia C como en el sentido inverso; el efecto resultante depende del valor del potencial en A y en C.

Ya se ha visto que si las resistencias de los cuatro lados se eligen de manera que se tenga

$$r' r_2 - r'' r_1 = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{r'}{r''} = \frac{r_1}{r_2},$$

se tendrá $i = 0$, es decir que no pasará corriente alguna por el puente y que un galvanómetro intercalado en él permanecerá en el cero: lo que se utiliza es el caso particular. Como la diferencia de potencial entre los puntos A y C es nula al mismo tiempo que la corriente i, es claro que puede utilizarse un electrómetro capilar para equilibrar el puente.

2°. *Aplicación del método.* — Supongamos que se formen los dos lados BA y BC con dos carretes de resistencia que se pueden hacer equivalentes; que en CD se ponga un *reostato* R, es decir, un *conductor de resistencia variable y constantemente conocida*, y en AD la resistencia desconocida x, y por fin un galvanómetro en el puente.

Entonces se modifican las resistencias variables hasta que la aguja del galvanómetro quede en el cero. En ese momento la corriente derivada del puente es nula, y se tiene

$$r' r_2 - r'' x = 0,$$

de donde

$$x = \frac{r' r_2}{r''},$$

Se tendrá inmediatamente x en función de las tres resistencias conocidas.

Observación. — Para hacer la experiencia con más comodidad, se toma algunas veces $r' = r''$: basta para ello con tener dos carretes de resistencia *equivalentes*. Después se coloca la resistencia que se trata de medir entre A y D y se hace variar la longitud del alambre de un *reostato* que se coloca entre C y D, hasta que la aguja del galvanómetro vuelva al cero.

Como $r'' = r'$, la ecuación anterior se reduce á

$$x = r_2.$$

Hay ventaja en hacer las tres resistencias r' r'', r_1 tan iguales como se pueda, porque entonces el método presenta su máximum de sensibilidad.

3°. *Aparato de puente.* — En la práctica, la diagonal que contiene al galvanómetro y que constituye el puente, está también fuera del rombo, como lo que contiene la pila. Todo el sistema se encuentra colocado encima de una mesa horizontal. Las porciones B, A, D son reglas metálicas (fig. 892) de resistencias despreciables y que llevan en B, A y D topes que sirven para atar los alambres de

los carretes. En r' y lado BA se ata una caja de resistencia: en x se pone la resistencia que se trata de medir (AD). MN es un *reóstato de Pouillet*, quiere decir

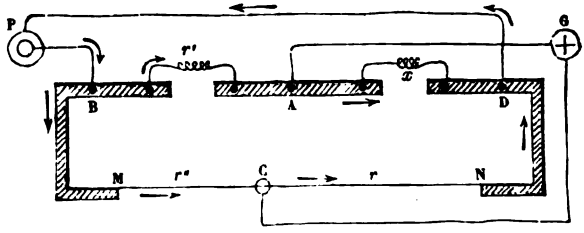


Fig. 892.

un simple alambre de platino tenso que la corredera C divide en dos partes, las cúales forman los lados BC y CD.

La manipulación es sumamente sencilla. Basta mover la corredera C hasta

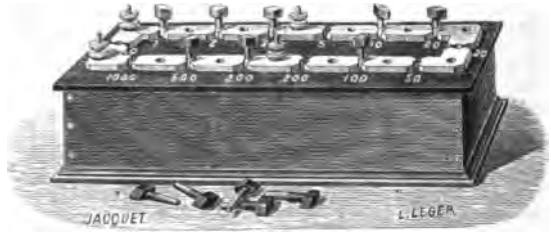


Fig. 893.

que se ponga en el cero la aguja del galvanómetro. En ese momento se tiene la ecuación de equilibrio anterior, de donde se deduce

$$\frac{x}{r'} = \frac{r}{r''}.$$

Observación. — *Cajas de resistencia.* — *Caja de puente* — *Las cajas de resistencia* son resistencias graduadas en ohms y contenidas en cajas provistas de llaves especiales (fig. 893); basta retirar de la caja una llave para introducir la resistencia correspondiente (fig. 894) en el circuito de la corriente que entra por A y sale por B. Ciertas cajas de resistencia, llamadas *cajas de puente*, están montadas de tal modo que permiten la comparación segura y rápida de las dos resistencias.

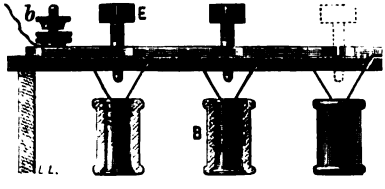


Fig. 894.

991. **Medida de la resistencia interior de una pila.** — Se puede, pongamos por ejemplo, cerrar la pila por una resistencia muy grande R que comprende un galvanómetro. Sea I la intensidad de la corriente indicada, sea por otra parte I' la intensidad de la corriente en una derivación de resistencia r, del mismo orden de magnitud que la de la pila. La aplicación de la ley de Ohm, según se ha

hecho en los problemas, da como valor x de la resistencia buscada, despreciando el cociente $\frac{r}{R}$,

$$\frac{x}{r} = \frac{I - I'}{I'}.$$

992. **Comparación de las fuerzas electromotoras de dos pilas.** — En el circuito de una pila ó de una batería de pilas auxiliares E se instala (fig. 895) una caja de resistencia R y un alambre perfectamente homogéneo AB. Un segundo circuito, que comprende una de las pilas que se trata de comparar de fuerza electromotora e_1 y un galvanómetro G está cerrado por una porción x de resistencia del alambre AB. Muévese la corredera e de modo que el galvanómetro se ponga en el cero, lo cual supone que la corriente derivada en el galvanómetro es de sentido contrario al que suministra E. Si la intensidad de la corriente en AB es entonces I, se tiene evidentemente

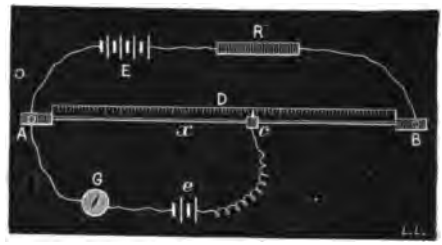


Fig. 895.

$$e = Ir,$$

siendo r la resistencia del segmento x cuando el galvanómetro está á cero.

Con la otra pila e' se tiene análogamente

$$e' = Ir', \quad \text{de donde} \quad \frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}.$$

Pero $$\frac{r}{r'} = \frac{x}{x'}, \quad \text{luego} \quad \frac{e}{e'} = \frac{x}{x'}.$$

Las longitudes x y x' se leen en una regla situada cerca de AB.

Observaciones. —1°. Conviene reemplazar el galvanómetro G por un electrómetro capilar si se quiere impedir que pase una corriente.

2°. La pila e puede ser uno de los tipos de fuerza electromotora descritos anteriormente.

993. **Comparación de las fuerzas electromotoras de dos pilas en marcha.** — Las dos pilas E y E' están dispuestas de modo que opongan sus corrientes (fig. 896) en la derivación AB, donde hay un galvanómetro ó un electrómetro. Las resistencias R y R' de las dos porciones AEB, AE'B del circuito se hacen variar hasta que el galvanómetro quede en el cero. En este momento, la intensidad I es la misma á lo largo de los dos segmentos AEB y AE'B. Aplicando la ley de Ohm al circuito EAB se tiene, E = RI, llamando E á la fuerza electromotora de la pila E.

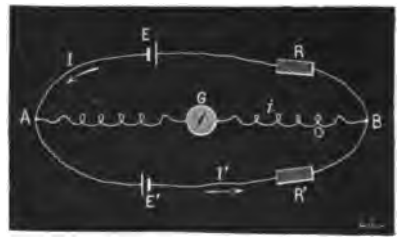


Fig. 896.

Tiénese análogamente á lo largo de E'BA $\quad E' = R'I, \quad$ de donde

$$\frac{E}{E'} = \frac{R}{R'}.$$

Si se hacen variar las resistencias cantidades r y r', tales que se siga teniendo

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + r}{R' + r'},$$

es claro, en virtud de una propiedad perfectamente sabida de las razones, que se tiene

$$\frac{E}{E'} = \frac{r}{r'}.$$

Este método permite apreciar el efecto de polarización de la pila.

CAPÍTULO IX

EFECTOS CALORÍFICOS Y LUMINOSOS DE LAS CORRIENTES VOLTAICAS. TERMOELECTRICIDAD.

994. **Fenómenos generales.** — 1°. *Fusión y volatilización de los sólidos.* — Una corriente que recorre un alambre metálico produce en él efectos análogos á los de las descargas de baterías : el alambre se calienta, se pone incandescente, se funde ó se volatiliza, según que sea más ó menos largo, de diámetro más ó menos grueso, y según que la corriente producida es más ó menos intensa. El carbón es el único cuerpo que se ha mostrado refractario á la fusión por las corrientes. Sin embargo, Despretz logró, con una pila en batería formada por seis series paralelas de 100 elementos Bunsen cada una, elevar varitas de carbón muy puro á temperatura tal, que se encorvaron, se ablandaron y fué posible soldarlas unas con otras.

Con una corriente bastante intensa, se pueden fundir y aun volatilizar alambres finos de plomo, de estaño, de zinc, de cobre, de oro, de plata, de hierro, y aun de platino. El hierro y el platino arden con luz de color blanco deslumbrador, el plomo, con reflejos purpurinos; el estaño y el oro con resplandor blanco azulado; el zinc con otro mezclado de blanco y de rojo; por fin, el cobre y la plata dan una luz verde.

2°. *Elevación de temperatura en los líquidos.* — El paso de una corriente á través de un líquido aumenta también su temperatura, tanto más cuanto más intensa es la corriente y cuanto menos buen conductor es el líquido.

995. **Leyes de Joule.** — Las leyes de estos fenómenos fueron descubiertas por Joule, quien las demostró valiéndose de un calorímetro especial que permitía calcular la cantidad de calor emitida en un alambre de resistencia conocida por una corriente de intensidad conocida. Ya antes se las ha hecho depender del principio de la conservación de la energía. He aquí los enunciados :

1°. *La cantidad de calor emitida, en un tiempo dado, en un conductor*

de resistencia determinada, está en razón directa del cuadrado de la intensidad de la corriente.

2°. *La cantidad de calor emitida por una corriente de intensidad dada, está en razón directa de la resistencia del conductor.*

Estas leyes se incluyen en la fórmula siguiente:

$$Q = Ar\, I^2\, t,$$

en que A es una constante, á saber, la inversa del equivalente mecánico de la caloría, r la resistencia de la porción de circuito considerada, I la intensidad de la corriente, y t la duración del paso.

Estas leyes se aplican á todas las porciones interiores ó exteriores del circuito que cruza la corriente. Las comprobó Becquerel, quien las aplicó también á los conductores exteriores líquidos, por lo menos en el caso de que no haya reacción secundaria que absorba calor.

CONSECUENCIA. — *Temperatura límite de un conductor* — Si un conductor tiene una longitud l, un radio r, y si está atravesado por una corriente de intensidad I, recibe por segundo una cantidad de calor igual á

$$\frac{1}{E}\, I^2\, \frac{l\rho}{\pi r^2},$$

siendo ρ la resistencia específica del conductor. Si e es el poder emisivo de su superficie, emite por radiación una cantidad de calor igual á $2\pi r le$ T, cuando el exceso de su temperatura sobre el medio ambiente es igual á T. Pero la temperatura límite T se alcanza cuando el conductor emite por radiación todo el calor que recibe. Entonces se tiene

$$2\pi rle\, T = \frac{I^2}{E}\, \frac{l\rho}{nr^2}, \quad \text{de donde} \quad T = \frac{I^2}{2\, E\pi^2} \cdot \frac{\rho}{er^3}.$$

En realidad ρ y e varían con la temperatura, pero su cociente es sensiblemente constante. La seguridad de los aparatos exige que se evite elevación de temperatura demasiado grande.

996. **Origen del calor que se desprende en la pila.** — Este calor se debe á la oxidación del zinc y á la combinación del óxido con el ácido sulfúrico en el par Volta. Joule ha probado que *es proporcional al número de equivalentes de zinc consumidos para producir la corriente.* De manera que la corriente *no crea* el calor, sino que se limita á transportar á las diferentes partes del circuito, proporcionalmente á su resistencia, el calor producido en la pila por las acciones químicas.

Silbermann y Fabre, que demostraron la ley de Joule, observaron que la doble acción química de la oxidación del zinc y de la combinación con el ácido sulfúrico del óxido formado hace desprenderse 18796 pequeñas calorías por equivalente de zinc disuelto, y que estas calorías reaparecen integralmente en el circuito exterior é interior de la pila.

997. **Asimilación de la pila eléctrica á una máquina térmica.** — Como la acción electromotora en la pila se traduce en calor, y como éste puede convertirse

siempre en trabajo, ha sido lícito comparar la pila con una máquina térmica, donde la combustión del zinc reemplaza la del carbón, y que sería capaz de producir un trabajo determinado, *equivalente* al calor que desaparece en el circuito. En efecto, habiendo colocado M. Fabre en una de las muflas del calorímetro de mercurio una pequeña pila y en la otra un pequeñísimo motor electromagnético que se podía poner en movimiento según deseaba el operador, observó que mientras estaba en reposo la máquina, el calor desprendido en todo el circuito era constantemente de 18796 calorías por equivalente de zinc disuelto, pero que el número de calorías disminuía desde que la máquina funcionaba, y que el calor producido era equivalente al trabajo efectuado.

998. **Efectos luminosos.** — Los efectos luminosos de las corrientes son consecuencias de sus efectos caloríficos. Así que el desprendimiento de calor es bastante intenso, hay *emisión de luz*, que se manifiesta sea por chispas, sea por la incandescencia de los reóforos, sea por un *arco voltaico*.

Como los polos de una pila presentan escasa diferencia de potencial, salvo en el caso de un número de pares considerable, no se produce chispa cuando los reunimos por medio de un alambre de cobre; pero á la ruptura del circuito salta una chispa, tanto más fuerte cuanto más numerosos son los pares. Cuando están reunidos por medio de un alambre de hierro ó de platino los polos de una pila poderosa, siendo ese alambre bastante fino para ser muy resistente, pero bastante grueso para no fundirse, ese alambre se vuelve incandescente y despide vivo reflejo durante todo el tiempo que tarda en pasar la corriente. Si el alambre está arrollado sobre sí mismo en forma de hélice, el efecto luminoso aumenta.

999. **Arco voltaico : su constitución : su elevada temperatura.** — Como principalmente se obtiene un hermoso efecto de luz eléctrica es tomando por eléctrodos dos conos de carbón de retorta. El carbón negativo (—) es fijo, mientras que el positivo (+), puede subir ó bajar más ó menos, sea á mano, sea por medio de un mecanismo. Una vez en contacto los carbones, la corriente pasa y los pone en seguida incandescentes. Si entonces se les separa, se produce entre ellos un arco luminoso, de brillo deslumbrador, á que se ha dado el nombre de *arco voltaico* (fig. 897). La longitud que este arco puede alcanzar depende de la fuerza electromotora del foco de electricidad[1].

Obsérvase que, aun en el vacío, el carbón positivo disminuye lentamente, y se ahueca, mientras que el negativo aumenta. La diferencia es mucho más sensible en el aire : el carbón positivo *se gasta dos veces más de prisa* que el negativo[2]. Primero se admitió para explicar este hecho que hay transporte de las moléculas de carbón del primer polo al segundo. Pero si en vez de formar el arco entre dos carbones se toman como eléctrodos dos metales diferentes, por

1. La figura 897 representa un arco voltaico aumentado por proyección (experiencia de Foucault).

2. Con tal que el arco proceda de un electromotor de corriente continua (pila, acumulaciones ó dinamo).

ejemplo cobre y plata, se observa, por los depósitos que se producen, que hay transporte en ambos sentidos. Esto ocurre igualmente con los carbones, pero como el transporte es más abundante del polo positivo al negativo, no se observa más que el resultado.

De manera que el arco voltaico se debe á las partículas de carbón que son volatilizadas y después transportadas de un polo á otro, for-

Fig. 897.

mando una cadena continua que cierra el circuito; esta cadena presenta gran resistencia y se calienta hasta producir el vivo desprendimiento de luz que caracteriza el arco.

En resumen, el arco voltaico se debe á la incandescencia de un conductor gaseoso *muy resistente*, cuyo brillo aumenta considerablemente como el de todas las llamas, por la presencia de partículas sólidas de carbón.

El hueco ó *cráter* del carbón positivo es más luminoso que lo demás del arco. Su temperatura, independiente de la potencia del arco, ha sido calculada por M. Violle en 3500° próximamente.

1000. **Aplicaciones del arco voltaico.** — La elevada temperatura del arco voltaico ha tenido numerosas é importantes aplicaciones industriales. Citaremos en particular :

1°. El alumbrado de grandes espacios por medio de los aparatos llamados *reguladores de luz eléctrica*.

2°. La soldadura *autógena* de los metales, por ejemplo del hierro (*soldadura eléctrica*).

3°. La fabricación industrial (*electro-metalurgia*) de ciertos metales ó aleaciones, tales como el aluminio, el bronce de aluminio, y de los metales raros. Á este género de aplicaciones se refieren los trabajos de M. Troost, de M. Joly y de M. Moissan. Citemos también las magníficas experiencias de este último sobre la reproducción del diamante.

Fabricación del bronce de aluminio. — Horno Héroult. — Citaremos, como ejemplo de los procedimientos electro-metalúrgicos, el método de Héroult para la fabricación del bronce de aluminio. Consiste en tratar directamente por el arco voltaico una mezcla de *corindón* (alúmina cristalizada), de cobre en granos muy puro y de carbón comprimido, en un horno especial llamado *horno eléctrico*. Este consiste en una caja de fundición *au* (fig. 898), forrada interiormente de ladrillos de carbón aglomerado, lavados con alquitrán, que constituyen un revestimiento refractario y conductor A, y cerrada por una placa de grafito KK. Las materias que se van á tratar son introducidas por dos aberturas laterales *nn* practicadas en el obturador y, por una abertura central cuadrada el eléctrodo positivo, formado por un haz de placas de carbón *bb*. El polo negativo del electromotor (máquina dinamo-eléctrica) se une con el revestimiento interior del horno por medio de la fundición *a* y de los topes *a'*. Finalmente, un orificio C, cerrado por un tapón de carbón, permite dar salida al metal fundido, una vez terminada la operación.

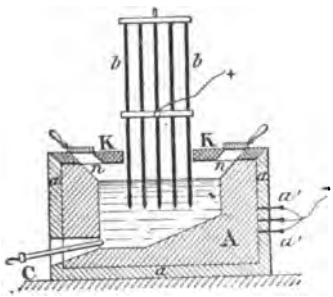


Fig. 898.

Horno Moissan. — M. Moissan ha logrado preparar el carbono cristalizado ó diamante en un horno eléctrico de reverbero, dispuesto de modo que se utiliza el enorme calor emitado por el arco. Compónese esencialmente de un recinto de carbón, alojado en un trozo de cal. El arco salta entre dos eléctrodos horizontales de carbón, que pasan por dos agujeros practicados en las paredes del horno, y

que dos carricoches sostienen, acercándolos ó alejándolos á voluntad.

Horno Ducretet. — M. Ducretet ha construído recientemente un modelo muy práctico de este horno eléctrico.

CORRIENTES TERMOELÉCTRICAS.

1001. **Definición.** — **Experiencia de Seebeck.** — Así como las corrientes engendran calor, éste puede dar origen á corrientes, en ciertas condiciones. Estas corrientes, de que ya se ha hablado, se llaman *termoeléctricas*, para distinguirlas de las *hidroeléctricas*, debidas á las acciones químicas.

Sabíase desde muy atrás que varios cristales naturales, como la turmalina y el topacio adquieren propiedades eléctricas cuando se eleva su temperatura, y Volta descubrió que una lámina de plata calentada desigualmente en sus extremidades constituye un elemento electromotor; pero Seebeck fué el primero que en 1821 demostró claramente que el movimiento del calor en un circuito metálico da origen á corrientes eléctricas.

Tomaba como circuito una lámina de cobre *mn* cuyos extremos se encorvan y se sueldan con otra de bismuto *op* (fig. 899). Dentro del circuito así formado hay una aguja imantada *a* móvil sobre un eje. Colócase el aparato en la dirección del meridiano magnético y se calienta una de las soldaduras: entonces se ve que la aguja toma una desviación que indica el paso de una corriente *en el sentido de* n *hacia* m, *quiere decir, de la soldadura caliente á la fría pasando por el cobre.* Si en vez de calentar la soldadura *n*, se la enfría con hielo, conservando á la otra su temperatura, prodúcese también una corriente, pero de sentido inverso, quiere decir, que va de *m* hacia *n*. En ambos casos, la corriente es tanto más intensa *cuanto mayor es la diferencia de temperatura de las dos soldaduras.*

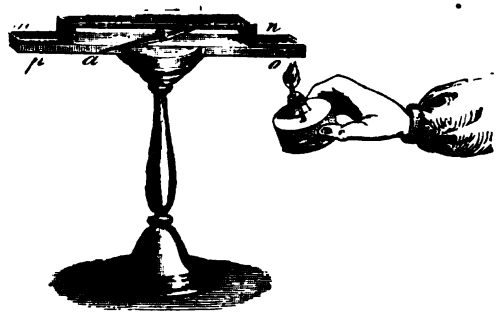


Fig. 899.

Por fin, si se calientan igualmente las dos soldaduras, no hay producción de corriente.

1002. **Pares y Pilas termoeléctricas : Pilas de Pouillet, de Nobili, de Clamond.** — Llámase *par termoeléctrico* á un sistema de dos metales soldados uno con otro, como el de Seebeck, y cuyas extremi-

dades libres pueden ser reunidas por medio de un conductor. La figura 900 representa el par bismuto-cobre de que se sirvió Pouillet en sus trabajos sobre las leyes de las corrientes.

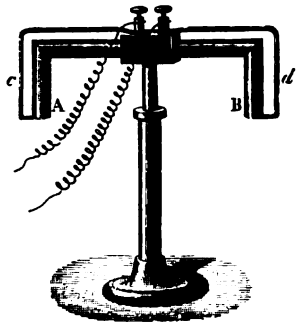
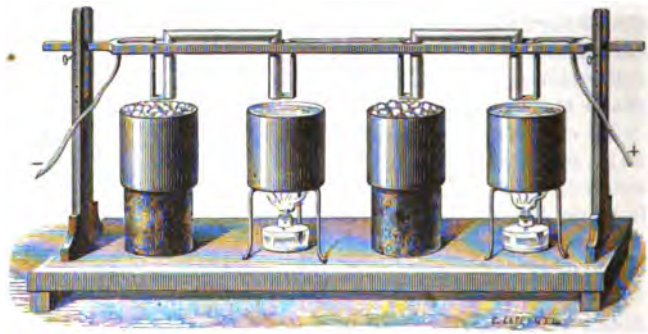


Fig. 900.

Reuniendo en serie varios de estos pares, como si fueran elementos de Volta, se forma una *pila termoeléctrica*. Hácesela funcionar manteniendo las soldaduras de orden impar, por ejemplo. á cero dentro de hielo, y calentando las de orden par á 100° en vasos llenos de agua hirviendo (fig. 901).

La disposición de las pilas termoeléctricas ha variado mucho. Una de las más comunes es la de Nobili (fig. 906).

M. Clamond imaginó una pila termoeléctrica muy práctica (fig. 902). Está formada de elementos constituídos individualmente por hierro F y una aleación de zinc y de antimonio A (fig. 903) con soldadura



Fg. 901.

autógena. Esos elementos se asocian en series según capas horizontales unidas entre sí por sus polos de nombres contrarios *b*, *b*. La pila se calienta bien con gas dentro de la chimenea C, alrededor de la cual se encuentran dispuestas las soldaduras *pares*. Las *impares* están colocadas por fuera y se agrupan de modo que presentan gran superficie de enfriamiento.

El tipo de 130 elementos puede suministrar una *fuerza electromotora* de 8 volts y tiene una *resistencia interior total* de 3, 2 ohm (ó sea 0,025 ohm por elemento). El rendimiento de una pila de esta clase se acerca á $\frac{1}{200}$.

1003. **Serie termoeléctrica. — Poderes termoeléctricos de los metales. — Fenómeno de la inversión.** — Las variaciones de sentido y de intensidad de la corriente termoeléctrica han sido estudiadas por varios físicos, entre otros Becquerel. Este midió la intensidad en cada caso por medio de un galvanómetro. Primeramente determinó el *sentido* de las corrientes obtenidas por la asociación de los diferentes metales, logrando colocarlos en un orden tal que si se asocia un metal de la serie con otro cualquiera de los que le siguen, da una corriente que va del primero al segundo, *pasando por la soldadura caliente*. Esta serie de metales, que se llama *serie termoeléctrica*, es la siguiente :

Bismuto.	Plomo.
Nickel.	Cobre.
Platino.	Oro.
Paladio.	Zinc.
Cobalto.	Hierro.
Manganeso.	Arsénico.
Plata.	Antimonio.
Estaño.	

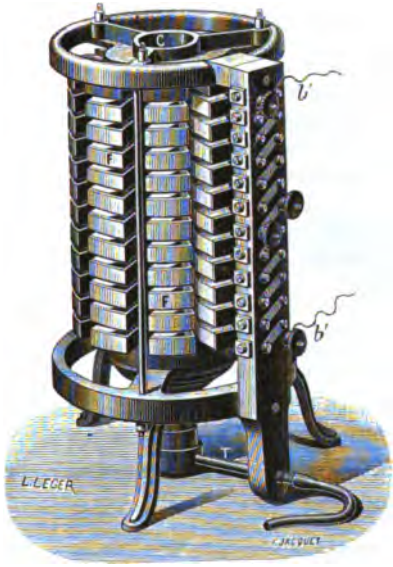


Fig. 902.

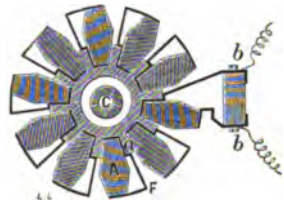


Fig. 903.

Becquerel determinó después el *poder termoeléctrico* de un metal pareado con otro en un circuito cerrado : llamaba así á la *intensidad de la corriente* que se obtiene calentando una de las soldaduras á temperatura dada, 20° por ejemplo, mientras que la otra se conserva á cero.

Ciertos pares presentan el fenómeno de la *inversión*, quiere decir que la fuerza electromotora, después de aumentar con la temperatura de la soldadura calentada, disminuye, y cambia después de sentido. Por ejemplo, con el par *Cobre-Hierro*, el máximum de la fuerza electromotora se efectúa á eso de 274°.

1004. **Leyes de las fuerzas electromotoras termoeléctricas.** — Se ha estudiado en el electrómetro la fuerza electromotora de los pares termoeléctricos en condiciones dadas. Designando por $E_{\theta}^{\theta'}$ la fuerza electromotora de un par cuyas soldaduras se mantienen respectivamente á las temperaturas θ (soldadura fría) y θ' (soldadura caliente), pueden enunciarse las leyes siguientes :

1°. *Ley de las temperaturas sucesivas. — La fuerza electromotora de un par dado, entre dos temperaturas θ y θ', es igual á la suma de las fuerzas electromotoras del mismo par* $E_{\theta}^{\theta_1}$ *y* $E_{\theta_1}^{\theta'}$, *siendo θ_1, una temperatura comprendida entre θ y θ'.*

2°. *Ley de los metales intermedios. — La fuerza electromotora de un par que tiene uno de sus contactos á la temperatura θ, no cambia cuando se reemplaza el contacto por uno ó varios metales á temperatura θ. Será pues posible, sin cambiar nada, establecer una soldadura efectiva entre los dos elementos de un par.*

3°. *Leyes de Pouillet.* — Á estas leyes puede agregarse la general

de Pouillet, que fué descubierta según se sabe primeramente para esta especie de pila.

La intensidad I *de una corriente termoeléctrica suministrada por una pila en condiciones determinadas se expresa por la fórmula general*

$$I = \frac{E}{r}.$$

Observación. — *Constantes de las pilas termoeléctricas.* — E es la fuerza electromotora de la pila y r la resistencia exterior. Cuanto á la interior, es generalmente despreciable sobre todo para un pequeño número de pares, formados por láminas ó barras gruesas y delgadas.

De manera que una pila termoeléctrica es exactamente comparable á otra hidroeléctrica que tuviese resistencia interior *despreciable* y *pequeña* fuerza electromotora.

1005. **Origen de las corrientes termoeléctricas. — Efecto Peltier.** — Las corrientes termoeléctricas no provienen de acciones químicas, pues Becquerel observó que se producen también en el vacío ó en un gas inerte, como el hidrógeno. Magnus hizo ver que si se calienta en una de sus soldaduras un circuito de dos conductores cilíndricos de cobre, de diámetro desigual, pero que se encuentran ambos en las mismas condiciones físicas, no produce corriente, sea cual fuere la diferencia de diámetro y de masa entre sus conductores. Sólo hay corriente cuando existe *una diferencia de estructura ó de densidad* á ambos lados del punto calentado.

Con estos hechos puede relacionarse el fenómeno descubierto por Peltier (*efecto Peltier*). Cuando circula una corriente en un circuito formado por dos conductores diferentes, se produce una elevación de temperatura ó un enfriamiento, según el sentido de la corriente, en el punto donde ésta sale de uno de los conductores para pasar al siguiente. La cantidad de calor cedida ó tomada es proporcional á la intensidad de la corriente.

En resumen, precisa considerar las fuerzas electromotoras termoeléctricas como resultante de fuerzas electromotoras de contacto de Volta, que variaran con la temperatura del contacto de los metales heterogéneos. La energía se toma de la soldadura caliente, gracias al efecto Peltier. Y para comprender la *inversión*, precisa tener en cuenta además, fuerzas electromotoras señaladas por lord Kelvin, y que se deben á la no uniformidad de temperatura en un conductor homogéneo [1].

1006. **Termomultiplicador.** — Ya hemos expuesto (547) la importante aplicación de las corrientes termoeléctricas hecha por Melloni en el termomultiplicador.

Descripción de la pila. — La pila termoeléctrica de este aparato termométrico está constituída por una serie de pares bismuto-antimonio de 30 mm. de longitud. Este par tiene la ventaja de poseer fuerza electromotora proporcional á la diferencia de temperatura de las dos soldaduras, entre 0° y 100 [2] (fig. 904). Los pares se agrupan de manera que todas las soldaduras de orden impar se encuentran por una misma parte y todas las de orden par por otra (fig. 905) y se ha

1. Véase J. Joubert, *Traité élémentaire d'électricité.*
2. Varía 0,000 057 de volt por grado.

reducido más aún el volumen de la pila disponiendo paralelamente, unos al lado de otros (fig. 906) varias series de pares semejantes, aislados entre sí y de la armadura por bandas de papel barnizado. El último bismuto de la primera serie está soldado lateralmente con el primer antimonio de la segunda, y así sucesivamente, de modo que resulte un conjunto de cinco ó seis series de cinco pares cada una. La pila una vez dispuesta de esta manera, es mantenida en una armadura de cobre P provista de un pie de charnela, lo

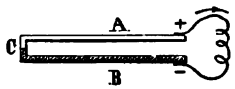


Fig. 904.

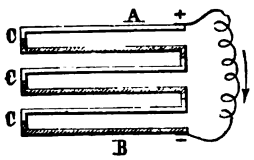


Fig. 905.

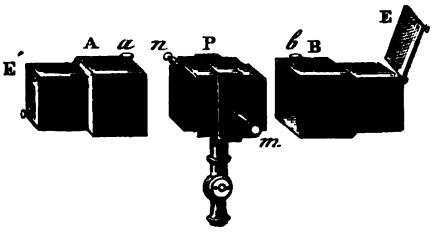


Fig. 906.

cual permite darle diferentes inclinaciones. Por fin, en los lados del aparato se fijan dos topes *m*, *n*, que comunican, uno con el primer antimonio, y el otro con el último bismuto: estos son los dos polos de la pila. Para proteger sus dos caras, se fijan dos estuches rectangulares A y B por medio de tornillos de presión *a* y *b* sobre la pieza P. Finalmente, dos pantallas E y E', que se suben ó se bajan á voluntad, permiten disponer las cosas de modo que sólo llegue el calor á una de las caras de la pila.

Graduación del termomultiplicador. — La operación consiste en graduar el galvanómetro del instrumento, de modo que sus indicaciones midan directamente las intensidades de los haces caloríficos que inciden sobre la pila.

Tómanse dos focos de calor casi iguales, por ejemplo dos lámparas Locatelli, A B.

1°. Hácese actuar A sola, á una distancia tal que produzca la desviación de 1° : tómase como *unidad de calor* la radiación correspondiente.

2°. Hácese actuar del mismo modo B por la otra parte, hasta obtener una desviación de 1° inversa de la anterior : en este momento B envía también la *unidad de calor* á la pila. Si entonces se hicieran actuar los dos focos simultáneamente, la aguja del galvanómetro debería permanecer en el cero : así lo prueba la experiencia.

3°. Entonces se acerca A, dejando á B en su sitio, hasta que la desviación vuelva á ser 1°. Sea I_a la intensidad actual del haz emitido por A é I_b la del haz emitido por B ; como la desviación se debe á la diferencia de acción de los dos focos, resulta evidentemente

$$I_a' - I_b = 1, \quad \text{de donde} \quad I_a' = 1 + I_b. \quad \text{Pero} \quad I_b = 1, \quad \text{luego} \quad I_a' = 2.$$

4°. Ahora bien, si se hiciera actuar A sola, el galvanómetro *sufriría una desviación igual á* 2° ; luego un haz de *intensidad* 2, está representado por *una desviación de* 2°.

Esta proporcionalidad se mantiene hasta 25° próximamente.

5°. Continuemos la graduación. Supongamos que A produzca una desviación de 25° : el haz que esta lámpara envía entonces á la pila tiene una intensidad 25. Pongamos B por la otra parte, de modo que vuelva la aguja al 0° : entonces la intensidad del haz emitido por B es 25. Acerquemos A hasta producir una desviación de más de 10°. De ahí se deduce como anteriormente que la diferencia $I_a - I_b$ es igual á 10 (puesto que hay proporcionalidad hasta 25°, entre las intensidades caloríficas y las desviaciones), y se tiene

$$I_a = I_b + 10 = 25 + 10 = 35.$$

Ahora bien, si se hace actuar A sola, la desviación *no es* 35°, *sino* 34°. Ya no hay, pues, proporcionalidad, y esta diferencia se acentúa más á medida que la desviación aumenta.

Entonces se anotará que la *intensidad* 35 corresponde á la *desviación* 34°. Continuando de la misma manera, se hallarán empíricamente todas las intensidades, correspondientes á las desviaciones de la aguja, desde 25° hasta 90°.

Observaciones. — 1°. *Sustitución de las desviaciones por impulsiones.* — Si el haz calorífico no actúa sobre la pila más que poco tiempo, ésta no se calienta y la aguja vuelve al 0° desde que la acción termina. No ocurre lo mismo cuando la acción dura. Pero al principio se estaba obligado á hacerla durar hasta que la aguja hubiera tomado su posición de equilibrio final. Habiendo observado Melloni que la *impulsión inicial* de la aguja es *proporcional* á la *desviación final*, puede sustituirse la observación de las desviaciones por la de las impulsiones. Esto permite reducir cada experiencia á *un instante.*

2°. *Tabla de graduación.* — La graduación empírica del termomultiplicador se compondrá, pues, de una tabla de tres columnas, indicando la primera las impulsiones, la segunda las desviaciones de la aguja y la tercera las cantidades de calor correspondientes. Debe hacerse una tabla para cada instrumento.

3°. Esta graduación del galvanómetro puede servir además para medir corrientes cualesquiera, puesto que las indicaciones del galvanómetro indican al mismo tiempo las intensidades caloríficas y las de las corrientes.

1007. **Pinzas termoeléctricas. Aguja termoeléctrica.** — Un sistema de dos pares termoeléctricos *ab*, *a'b'* dispuestos en serie (fig. 907), de modo que se puedan aplicar dos de las soldaduras frente al punto cuya temperatura se desea apreciar, constituye una *pinza termoeléctrica.* Un galvanómetro mide la intensidad de la corriente producida; también sería posible utilizar un electrómetro y calcular la fuerza electromotora. Si los pares son bismuto-antimonio, la corriente es proporcional á la diferencia de las temperaturas hasta 100° próximamente.

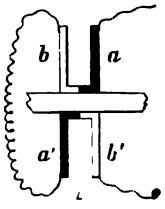


Fig. 907.

En la *aguja termoeléctrica* de Becquerel se oponen los pares y se obtiene la temperatura de un punto determinado haciendo variar la temperatura conocida de la otra soldadura de modo que se anule toda corriente.

Formando un par platino-rodiado una de cuyas soldaduras se mantiene en el foco cuya temperatura se va á apreciar, puédese con precisión muy suficiente para la industria, anotar temperaturas que alcancen hasta 1200 grados y aun más. M. Lechatelier ha formado con estos instrumentos su escala de las temperaturas elevadas.

CAPÍTULO X

INDUCCIÓN ELECTRODINÁMICA.

1008. **Definiciones.** — Faraday llamó *corrientes de inducción*, ó *corrientes inducidas*, á corrientes que se producen *á distancia*, en circuitos metálicos cerrados, por la influencia, sea de corrientes eléctricas, sea de imanes poderosos, sea del magnetismo terrestre. Hay pues que distinguir, por lo menos á primera vista, según el origen de las corrientes inducidas:

1°. La inducción por las corrientes ó *inducción voltaica;* 2°. la inducción por los imanes ó *inducción magnética;* 3°. la inducción por la tierra ó *inducción telúrica.*

Á estos tres modos de inducción corresponden tres categorías de corrientes, que son las *corrientes inducidas propiamente dichas;* pueden añadirse otros dos modos de inducción:

1°. La inducción por descargas de botellas de Leyden ó de baterías eléctricas, llamada *leyden-eléctrica;*

2°. La inducción de una corriente voltaica sobre su propio circuito, ó *inducción refleja* (self-induction), la cual engendra las *extra-corrientes.*

1009. **Inducción voltaica.** — *Experiencias.* — Cuando nace en un circuito cerrado una corriente inducida, bajo la influencia de otra corriente, esta última se denomina *corriente inductora.*

La inducción voltaica se produce en tres circunstancias: 1°. cuando la corriente inductora empieza ó acaba; 2°. cuando su intensidad

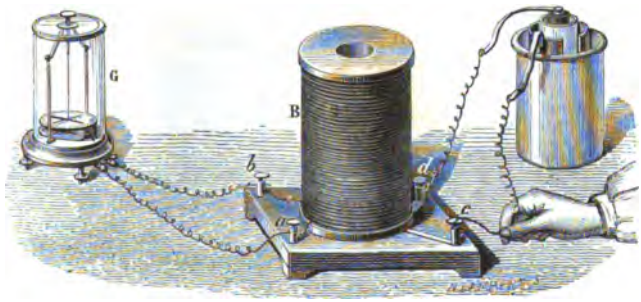


Fig. 908.

crece ó disminuye; 3°. cuando su distancia al circuito inducido se agranda ó se acorta.

1er. *Procedimiento.* — Úsase un *carrete* de dos alambres (fig. 908), formado por un cilindro hueco de cartón ó de palo, donde se arro-

llan en hélice, primeramente un grueso alambre de cobre, y después otro más delgado, bien aislados ambos. El alambre grueso, que no da sino escaso número de vueltas, va á terminar en dos topes *c* y *d*, fijos en una tableta que sostiene el carrete: este es el *circuito inductor*; el alambre delgado, que se arrolla por encima del primero, da gran número de vueltas y termina en otros dos topes *a* y *b*: este es el *circuito inducido*.

Pónese un galvanómetro en este último circuito y en el inductor una pila con un interruptor. Entonces se observan los fenómenos siguientes:

1°. Desde que se establece la corriente inductora, el galvanómetro indica en el alambre una corriente *inversa*, esto es, de sentido contrario á la corriente inductora, que dura durante el período de establecimiento de ésta;

2°. Así que se interrumpe la corriente inductora, prodúcese de nuevo, en el alambre delgado, una corriente inducida *directa*, y de duración idéntica al período de interrupción.

2°. *Procedimiento.* — Tómase un carrete hueco B de un solo alambre largo y delgado (fig. 909) y otro carrete A de un solo alambre también, pero grueso y corto, que puede entrar en el primero. Si

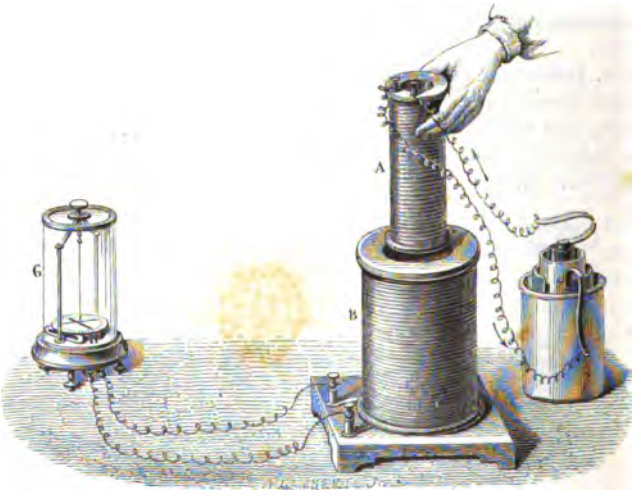


Fig. 909.

estando recorrido el carrete A por una corriente continua, se le introduce bruscamente en B, un galvanómetro que esté en comunicación con el último indica, por el sentido de su desviación, que inmediatamente se produce en el carrete más grueso una corriente *inversa* de la misma duración que el movimiento. Y si se retira A rápida-

mente, el galvanómetro acusa en el alambre una corriente inducida *directa*.

Observación. — Cuando en vez de introducir ó de retirar bruscamente el carrete de alambre grueso, se le acerca ó se le aleja con lentitud, el galvanómetro no indica sino una corriente pequeña, tanto más reducida cuanto más lento es el movimiento, quiere decir cuanto más dura la acción inductora.

3°. *Procedimiento.* — Si en vez de hacer variar la distancia de la corriente inductora se modifica su intensidad, aumentando ó disminuyendo la resistencia de su circuito por ejemplo, se produce en el alambre fino una corriente inducida, que es *inversa* si la intensidad de la corriente inductora aumenta, y *directa* si disminuye.

1010. **Inducción magnética ó magneto-eléctrica.** — También un imán puede dar origen en los circuitos metálicos á corrientes de inducción. Faraday demostró este hecho por medio de un carrete hueco de un solo alambre largo y delgado análogo al precedente (fig. 909):

1°. Desde que se introduce la barra pasa por el alambre una corriente inducida, de la misma duración que el movimiento. Esta corriente es *inversa*, quiere decir, de sentido contrario á las de Ampère que se puede sustituir por el pensamiento al imán ó, si se quiere, al solenoide equivalente.

Apenas se retira la barra, la aguja del galvanómetro indica una corriente inducida directa.

2°. Si se coloca en el carrete de un solo alambre una barra de hierro dulce y se acerca á él primero, alejándolo luego, un fuerte imán, hay dos corrientes inducidas, originadas sucesivamente por la imantación y la desimantación sucesivas del hierro dulce: una es *inversa* y *directa* la otra;

3°. Se obtienen también corrientes inducidas en el alambre de un electroimán; se hace girar una gruesa barra imantada delante de los polos de éste, de modo que produzca imantación creciente ó decreciente en los polos del electroimán;

4°. Pueden realizarse igualmente estas variaciones de magnetismo haciendo girar una placa de hierro dulce delante de los polos de un imán permanente de forma de herradura: si cada rama está rodeada por un carrete, prodúcense ahí corrientes inducidas sucesivamente de sentidos contrarios.

Análogamente, se observa que un movimiento relativamente lento y limitado de un pedazo de hierro en la proximidad de este imán produce una corriente.

Observación. — La inducción por los imanes está conforme con la teoría de Ampère sobre el magnetismo. En efecto, como los imanes son verdaderos solenoides, las experiencias anteriores se explican por la inducción de las corrientes que recorren la superficie de los imanes, y la inducción por los imanes se convierte en un caso particular de la inducción por las corrientes.

1011. **Ley de Lenz.** — Analizando sucesivamente las acciones electrodinámicas ó electromagnéticas que se originan durante la inducción, es fácil ver que *el sentido de la corriente inducida es tal que se opone á la continuación de la causa que la produce: actúa como una reacción.* Esta ley general fué descubierta por el físico ruso Lenz.

Observación. — Obsérvese el hecho general de que la inducción se produce mientras hay movimientos ó variaciones eléctricas ó magnéticas inductoras: por consiguiente, la corriente inducida dura en realidad tanto como se quiere y no es exacto llamarla *instantánea.*

1012. **Magnetismo de Arago ó Magnetismo de rotación.** — 1°. *Historia.* — Arago fué el primero en observar, el año 1824, que el número de oscilaciones efectuadas por una aguja imantada, en tiempos iguales, cuando se la aparta de su posición de equilibrio, es muy disminuído por la proximidad de ciertas masas metálicas. Por ejemplo, una masa de cobre rojo convenientemente dispuesta puede reducir el número de las oscilaciones de 300 á 4. Este hecho que es una consecuencia de la ley de Lenz, entonces desconocida, es el principio de la amortización de las oscilaciones en los galvanómetros aperiódicos. El mismo físico descubrió en 1825 un hecho de influencia análogo: la acción rotatoria que un disco de cobre en movimiento ejerce sobre una aguja imantada.

2°. *Experiencia de Arago.* — Obsérvase este fenómeno por medio de un disco de cobre rojo M, móvil en torno de un eje vertical (fig. 910) y que se puede hacer girar más ó menos de prisa con la mano, por medio de una polea de manubrio y de un transmisor. Encima del disco hay un vidrio fijo, al cual se adapta un eje que sostiene una aguja imantada *ab.* Si el disco gira con movimiento lento y

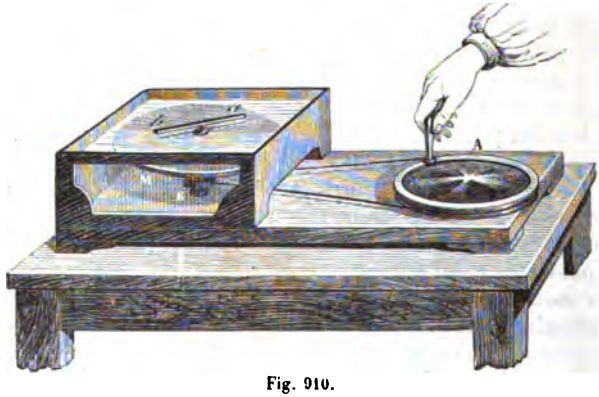


Fig. 910.

uniforme, la aguja se desvía en el sentido del movimiento, y se para á 20 ó 30° del meridiano magnético, según la velocidad de rotación del disco; pero si esta velocidad aumenta, la aguja acaba por desviarse más de 90°: entonces es arrastrada, efectúa una revolución completa, y sigue el movimiento del disco hasta que éste se para.

3°. *Circunstancias que influyen en el fenómeno.* — El efecto disminuye á medida que la aguja se aleja del disco, y varía mucho con la naturaleza de éste; es máximum con los metales de escasa resistencia eléctrica; con la madera, el vidrio y el agua es nulo.

El efecto se debilita mucho si el disco presenta soluciones de continuidad, sobre todo en el sentido de sus radios; pero recobra sensiblemente la misma intensidad cuando se sueldan las soluciones de continuidad con un metal cual-

quiera. Esta observación tiene mucho alcance práctico. Dividiendo convenientemente las masas conductoras de los aparatos se puede llegar á disminuir mucho las corrientes inducidas en su masa, ó *corrientes de Foucault*, que calientan estos conductores y absorben de este modo una energía perdida para el trabajo mecánico.

4°. *Explicación del fenómeno.* — Arago no indicó la causa de estos fenómenos; Faraday fué el que en 1832 puso de manifiesto que se deben á corrientes de inducción, desarrolladas en los discos por la influencia de la aguja imantada: hay pues que atribuirlos á la *inducción magneto-eléctrica*.

1013. **Inducción telúrica.** — Faraday observó antes que nadie que el magnetismo terrestre puede desarrollar corrientes inducidas en circuitos metálicos que están en movimiento. La tierra actúa, sea como un poderoso imán central, dirigido paralelamente á la aguja de inclinación, sea como una inmensa corriente eléctrica, que va de este á oeste, paralelamente al ecuador magnético.

1°. *Experiencia de Ampère.* — Ampère dispuso una larga hélice de alambre de cobre cubierto de seda en el plano del meridiano magnético, paralelamente á la aguja de inclinación; haciendo girar á esta hélice 180° al rededor de un eje que la atravesaba en su punto medio, observó que en cada semi-revolución pasaba una corriente por un galvanómetro que estaba en comunicación con la hélice.

2°. *Aro de Delezenne.* — Delezenne demostró la inducción telúrica por medio de una especie de máquina de inducción, llamada *aro de Delezenne* (fig. 911). Consiste éste en un círculo de palo RS, de cerca de un metro de diámetro, que lleva un circuito de alambres de cobre arrollados en una ranura periférica; hállase fijo á un eje *oa*, á que se puede imprimir movimiento de rotación por medio de

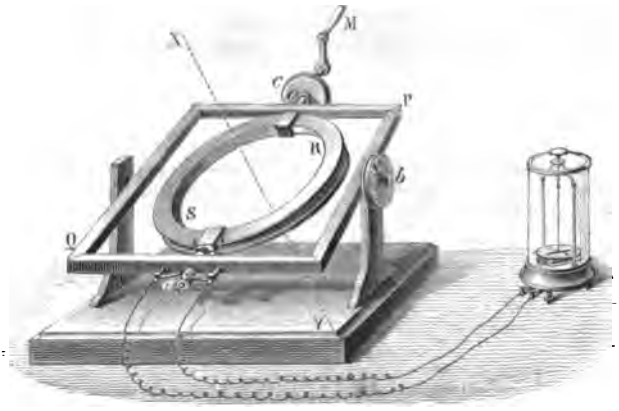


Fig. 911.

un manubrio M. El eje *oa* está sostenido por un marco PQ, móvil á su vez en torno de un eje horizontal. Un círculo graduado *b* indica, por medio de agujas dispuestas en estos dos ejes, la oblicuidad del marco PQ, y por consiguiente la inclinación del eje *oa* sobre el horizonte, y un segundo círculo graduado *c* marca el movimiento angular impreso al aro.

Una vez colocado el eje, *oa* en el meridiano magnético, y hallándose el aro RS

perpendicular á la dirección XY de la aguja de inclinación, se le imprime un movimiento de rotación lento, y entonces se observa que un galvanómetro que comunica con el carrete inducido indica la producción de una corriente inducida: la desviación aumenta hasta 90°; después disminuye y se hace nula cuando el aro ha efectuado una semi-revolución. Si el movimiento continúa, reaparece la corriente, pero en sentido contrario; alcanza un segundo máximum á 270°, y se anula otra vez después de una vuelta completa.

Si el eje *oa* es paralelo á la aguja de inclinación, no se produce ninguna corriente. Así se obtiene una corriente que cambia periódicamente de sentido si se comunica al aro un movimiento de rotación uniforme.

El aparato está provisto de una pieza *a*, llamada *conmutador* (1024), que permite *enderezar* las corrientes inducidas de sentido contrario, esto es, enviarlas al circuito exterior, siempre en el mismo sentido

1014. **Inducción leyden-eléctrica.** — También se pueden producir corrientes inducidas por la descarga de una botella de Leyden. Pónese en evidencia esta inducción llamada *leyden-eléctrica*, por medio del *aparato de Matteucci*.

Aparato de Matteucci. — Colócanse en pies derechos móviles, que se acercan ó se alejan á voluntad, dos platillos de vidrio de 33 centímetros de diámetro, fijos en dos marcos de latón ó de ebonita A y B (fig. 912). En la cara anterior del platillo A está arrollado en espiral un alambre de cobre C, de 1 mm de diámetro y

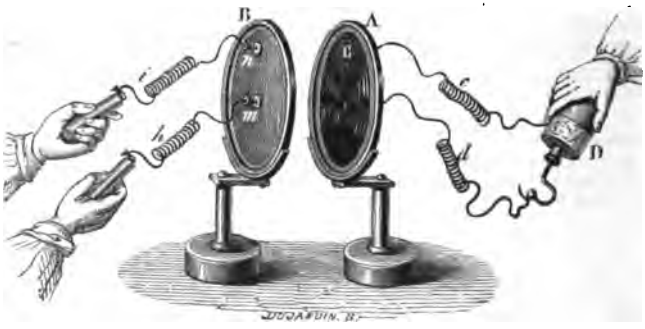


Fig. 912.

de 30 m de largo. Las dos puntas de este alambre pasan á través del platillo, una por el centro y la otra por la parte superior, y terminan en dos pinzas análogas á *m*, *n*, donde se introducen los dos reóforos de cobre *c* y *d* aislados con seda.

En la cara del platillo B, frente á A, se arrolla en espiral un alambre de cobre, más delgado que C. Sus extremos van á parar en las pinzas *m* y *n*, que reciben dos alambres *h* é *i*, destinados á transmitir la corriente inducida. En A y B se encuentra aislada cada espira de la siguiente por medio de una gruesa capa de barniz de goma laca.

Una de las puntas del alambre *c* se pone en comunicación con la armadura exterior de la botella, y la otra con el garfio: en el instante de saltar la chispa, se observa que en el carrete del platillo B se origina una corriente. Si una persona coge con las manos dos cilindros de cobre en comunicación con los alambres *i* y *h*, recibe una conmoción.

1015. **Inducción refleja** (*self-induction*) **y Extra-corrientes.** — Cuando se abre un circuito recorrido por una corriente, se obtiene en general una chispa, pero que apenas es sensible cuando el alambre que reune los dos polos es pequeño; si el operador se pone en el circuito, teniendo en cada mano un eléctrodo, no siente conmoción

alguna, á menos de que sea muy intensa la corriente. Pero si el alambre es largo, y si forma un carrete de espiras compactas, la chispa de apertura aumenta en intensidad, y entonces se sufre fuerte conmoción.

Faraday explicó este reforzamiento de la corriente en el momento de la ruptura por una acción inductora que la corriente ejerce desde cada espira sobre las inmediatas: de ahí resulta una corriente inducida directa que se sobrepone á la corriente que termina. Probó también que cerrando el circuito se produce una corriente inducida, pero *inversa*. Estas corrientes inducidas por la principal, se han llamado *extra-corrientes* y el fenómeno se denomina *inducción refleja* (self-induction en inglés quiere decir *inducción de una corriente sobre sí misma*).

1016. **Experiencias de Faraday.** — 1°. *Extra-corrientes de apertura.* — Los reóforos de una pila P se dirigen (fig. 913, I) á los extremos de un carrete de alambre fino C, y en BD se encuentra una derivación que comprende un galvanómetro G Cuando la corriente pasa de manera continua, la aguja se desvía; empiézase por volverla al cero donde se la mantiene por medio de un parador *n* que la impide girar en el sentido primitivo, pero que la deja libre en el opuesto. Ahora bien, si se rompe el circuito de la pila P se ve que la aguja es lanzada instan-

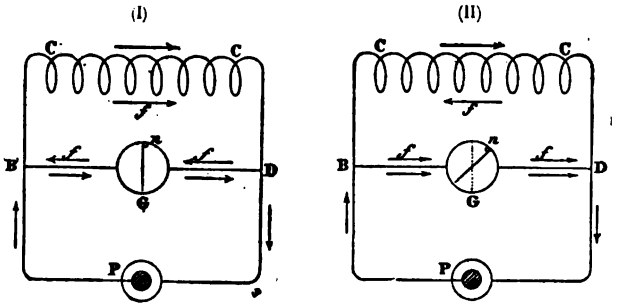


Fig. 913.

táneamente en el sentido *n*G hacia la izquierda: luego, por el galvanómetro ha pasado una corriente *directa*. En efecto, habiendo cesado la corriente de la pila, el único circuito cerrado que persiste es el CDBC, y como en la parte DB va una corriente desde D hasta B, precisa que recorra todo el circuito en el sentido CBDC, es decir, en el mismo que la corriente principal. La corriente *f*, que aparece de esta manera *por fuera* del circuito principal, ha recibido con motivo el nombre de *extra-corriente*.

2°. *Extra-corriente de cierre.* — Pónese la aguja con la mano en *n*, que es á donde la llevaría el paso continuo de la corriente, y se la mantiene allí mediante un tope que la impide volver al cero. Cuando se establece la corriente, la aguja es proyectada más allá de *n'* hacia la derecha: luego á la corriente principal se ha agregado otra secundaria del mismo sentido para dar origen á una desviación de la aguja superior á la normal: esta es la *extra-corriente directa*.

3°. Una variación cualquiera de la corriente produce análogamente un efecto de inducción sobre esa corriente.

1017. **Propiedades de las corrientes inducidas.** — Las corrientes inducidas tienen todas las propiedades de las voltaicas. Producen, lo mismo que éstas, efectos

fisiológicos, luminosos, caloríficos, químicos, y dan origen á su vez á nuevas corrientes inducidas. Por fin, desvían la aguja de los galvanómetros é imantan las barras de acero cuando se las hace pasar por un alambre de cobre arrollado en torno de estas barras.

1018. **Inducción en circuito abierto.** — La fuerza electromotora desarrollada por inducción, que da origen á las corrientes inducidas, se origina en todos los elementos de un alambre conductor, ya constituyan éstos un circuito cerrado ó uno *abierto*. Así, cuando se mueve, un pedazo de alambre AB (fig. 914) que está en relación con un electrómetro, entre los polos de un imán de forma de herradura, se observa en seguida una diferencia de potenciales entre sus extremos. De esta manera se puede hasta cargar un condensador.

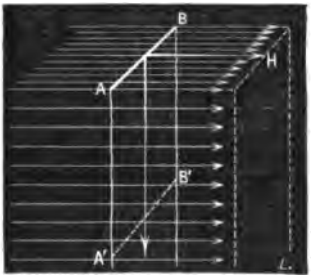


Fig. 914.

El carrete de Ruhmkorff es una importante aplicación de la inducción en *circuito abierto*.

1019. **Análisis experimental de la inducción.** — 1º. *Producción de la fuerza electromotora de inducción.* — Si se analiza un caso cualquiera de inducción, considerando exclusivamente el campo magnético del inductor, se ve que se origina una fuerza electromotora en un elemento de circuito cada vez que éste corta líneas de fuerza, moviéndose en el campo magnético. Esta fuerza electromotora tiene la misma duración que dicho *movimiento relativo* del campo y del elemento.

Consideremos, por ejemplo, un conductor rectilíneo AB de longitud l, que se mueve con velocidad uniforme v en un campo magnético constante de intensidad H, de tal manera que la dirección del alambre y la de la velocidad sean ambas perpendiculares á la dirección del campo magnético, á la vez que lo son entre sí. La *experiencia prueba* que mientras dura el movimiento subsiste en el alambre una fuerza electromotora dirigida desde B hacia A en el caso de la figura 914.

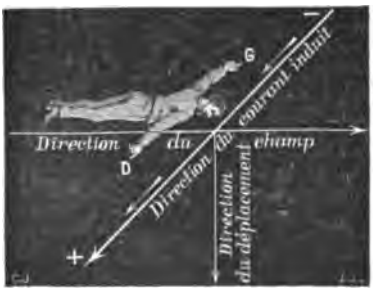


Fig. 915.

Si las extremidades A y B estuvieran reunidas por medio de un conductor sustraído á la inducción, y que no contuviera ninguna fuerza electromotora, el circuito constituído de este modo sería recorrido por una corriente constante en el sentido AA' B'B. Si el alambre está suelto, presenta sencillamente cargas electrostáticas en las extremidades : una positiva en A y una negativa igual en B. Estas cargas procuran neutralizarse á través del alambre y son mantenidas precisamente por la fuerza electromotora de inducción que las ha engendrado y que después es la única que equilibra su reacción.

2º. *Sentido de la fuerza electromotora inducida.* — *Regla del sacatapones de Maxwell.* — Para hallar el sentido de esta fuerza electromotora de inducción, se supone á un observador recostado en el campo según las líneas de fuerza (fig. 915) que le entran por los pies, y mirando en el sentido del movimiento del

conductor : la corriente que se produjera en AB, iría de su izquierda (G) á su derecha (D). Si el circuito no está cerrado, la extremidad próxima á la mano derecha se carga sencillamente de electricidad positiva y la otra de electricidad negativa.

Maxwell ha dado la regla práctica siguiente : *El sentido de la fuerza electromotora en* AB *es aquel en que debe hacerse girar á un sacatapones*, que estuviera plan

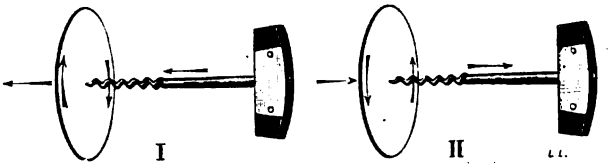


Fig. 916.

tado en el área ABA'B' (fig. 914), para que penetre en el sentido de las líneas de fuerza (fig. 916, I y II).

3°. *Cálculo de la fuerza electromotora inducida.* — Sea i la intensidad de la corriente producida y R la resistencia total del circuito. Según la fórmula de Biot y Savart, la acción electromagnética que actúa sobre el elemento móvil es igual á iHl. Como el movimiento de AB en un segundo es igual á la velocidad v, el motor exterior ha gastado para producirlo un trabajo electromagnético W, que es igual á $iHlv$.

Pero, si E es la fuerza electromotora que produce la corriente i, la energía eléctrica correspondiente tiene como valor Ei, con arreglo á la definición misma de la fuerza electromotora; tiénese pues

$$W = Ei, \quad \text{de donde} \quad E = H\,lv. \qquad [1]$$

4°. *Aplicación á la rueda de Barlow.* — Haciendo girar un disco de Barlow (959) de radio l cuyo plano fuera perpendicular al campo H, con una velocidad angular ω, se tendría $E = \frac{\omega l^2}{2}$ y en consecuencia una corriente constante en magnitud y sentido. Es un tipo de máquina de corriente continua.

5°. *Caso general de la fuerza electromotora inducida.* — Si en vez de suponer perpendiculares las direcciones H, l y v (según hemos hecho para simplificar), consideramos el caso general en que las tres componentes tienen direcciones cualesquiera, un cálculo de trabajo electromagnético análogo al anterior prueba que esto equivale á estimarlas perpendicularmente. Si se designa por α el ángulo del conductor con el campo, la componente de este último perpendicularmente á AB será H sen α.

Por fin, si φ es el ángulo de v con la perpendicular al plano BAH, la componente efectiva de v será $v \cos \varphi$, y se tendrá [2] $E = Hlv \operatorname{sen} \alpha \cos \varphi$.

Si las tres componentes son perpendiculares como supusimos al principio, se tendrá

$$\alpha = 90^0, \quad \text{de donde} \quad \operatorname{sen} \alpha = 1; \quad \text{y} \quad \varphi = 0, \quad \text{de donde} \quad \cos \varphi = 1,$$

y se vuelve á la primera fórmula.

1020. **Unidad C. G. S. electromagnética de fuerza electromotora y unidad práctica (Volt).** — La fórmula [1] sirve de definición á la unidad de fuerza electromotora. La unidad C. G. S. electromagnética de fuerza electromotora es la inducida en un conductor de 1 cm de largo, que se mueve con velocidad de 1 cm por segundo en un campo magnético de 1 unidad C. G. S.

El Congreso de los Electricistas de 1881 adoptó como *unidad práctica* una cantidad mucho mayor, que vale 10^8 unidades C. G. S. y que se llama el *volt*. Según esto, si se quiere expresar E en volts, la fórmula [1] se escribirá ·

$$E = Hlv \,.\, 10^{-8} \text{ volts}$$

Ejemplo numérico. — Supongamos que se mueva un conductor de 1,50 m con velocidad de 20 metros por segundo, verticalmente, estando el conductor dirigido de este á oeste; como la componente horizontal del magnetismo terrestre, única que producirá la inducción, es igual á 0,2 unidades C. G. S., la fuerza electromotora inducida será

$$e = 0{,}2 \,.\, 150 \,.\, 2000 = 60\,000 \text{ (unidades C. G. S.) ó } E = 60\,000.10^{-8} = 0{,}0006 \text{ volt}$$

(l debe expresarse en centímetros y v en centímetros por segundo).

1021. **Ley de Neumann.** — 1°. *Enunciado.* — Sea E la fuerza electromotora, la intensidad de la corriente inducida será

$$i = \frac{E}{R} = \frac{H\,l\,v}{R};$$

la cantidad q de electricidad producida durante el tiempo t es pues

$$q = it = \frac{H\,l\,v\,t}{R};$$

pero lvt es la superficie S descrita por el elemento AB en el campo magnético (fig. 914). Tiénese pues

$$q = \frac{H\,S}{R};$$

de donde la siguiente ley, que se debe á Neumann:

La cantidad de electricidad inducida por un mismo cambio de posición en un mismo campo es independiente de la duración del movimiento.

2°. *Demostración experimental.* — Hácese penetrar la descarga inducida en un galvanómetro donde los movimientos de la aguja sean muy visibles, como el galvanómetro de Bourbouze (fig. 917). La aguja recibe un impulso que la desvía cierto ángulo. Demuéstrase que este impulso es proporcional á la cantidad q de electricidad producida, con tal de que la duración de oscilación de la aguja, considerada aisladamente, sea grande relativamente á la duración de la descarga[1]. Se comprobará que la desviación es la misma para una modificación inductora idéntica introducida en el sistema, sea cual fuere el tiempo que dure esta modificación,

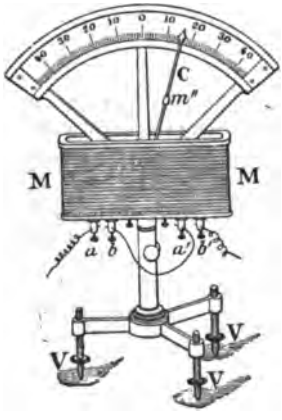


Fig. 917.

1022. **Coeficiente de inducción refleja y Coeficiente de inducción mutua.** — El producto Hs recibe con frecuencia el nombre de *flujo cortado* por AB (fig. 914). El flujo, abarcado en su propio campo por un circuito en que pasara la unidad de corriente, mide lo que se llama *coeficiente de inducción refleja.* Colocado en el campo de un circuito próximo, recorrido por la unidad de corriente, abarca un flujo que mide el *coeficiente de inducción mutua* de los dos circuitos.

1. Véase J. Joubert, *Traité élémentaire d'électricité.*

CAPÍTULO XI

APLICACIONES DE LA INDUCCIÓN VOLTAICA.

—

CARRETE DE RUHMKORFF Y TRANSFORMADORES.

1023. **Carrete de inducción de Ruhmkorff.** — Ruhmkorff fué quien primero construyó, en 1851, carretes de inducción de dos alambres, que son verdaderas *máquinas de corrientes inducidas voltaicas* y que además han servido de tipo á una serie de aparatos poderosos, recientemente introducidos en la industria eléctrica, con el nombre de *transformadores*.

1°. *Descripción.* — Los órganos esenciales de un *carrete de Ruhmkorff* son dos *circuitos*, de dimensiones variables, según la potencia del aparato, y un *interruptor*.

Circuitos. — Los dos circuitos están constituídos por dos carretes de alambre de cobre rojo perfectamente aislado; uno es de alambre grueso, de 2 á 2,5 mm de diámetro, y el otro de alambre fino, de un cuarto ó de un tercio de milímetro (fig. 918). Lo que constituye el circuito inductor es el alambre grueso; tiene de 40 á 50 metros de

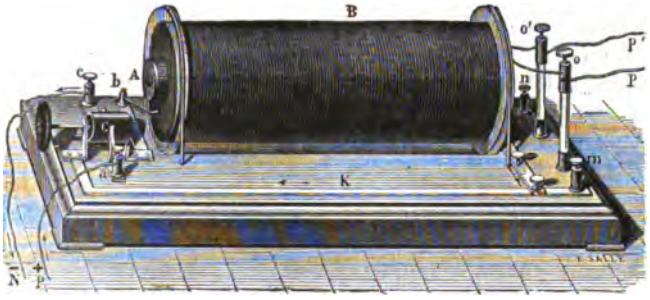


Fig. 918.

largo; está arrollado en primer lugar sobre un cilindro hueco de palo ó de cartón, que forma el núcleo del carrete, y envuelto luego por un mango de vidrio ó de caucho aislador, sobre el cual se arrolla el alambre fino, que es el inducido. La longitud de este último varía con las dimensiones de los carretes: en los grandes, puede tener hasta 120 000 metros de largo y entonces su diámetro es menor que en los carretes pequeños $\frac{1}{5}$ de milímetro en vez de $\frac{1}{3}$). Á fin de evitar entre dos espiras vecinas una descarga que presente una gran

diferencia de potencial capaz de agujerear el aislador, se arrolla á menudo el alambre inducido en rodajas sucesivas que se yuxtaponen y se reunen en serie después de haberlas separado por discos aisladores. Los carretes construídos de esta manera se llaman *carretes de tabique*.

Interruptor de martillo. — Hay varios modelos de *interruptores*. El más sencillo es el *interruptor de martillo* (fig. 919). Compónese esencialmente de una pieza de hierro móvil *o*, el *martillo*, la cual oscila entre un electroimán A que lo atrae de manera intermitente, y de una pieza *h*, llamada *yunque*, donde cae por su propio peso. El electroimán A está constituído por un haz de alambres de hierro dulce, que forma un cilindro algo más largo que el carrete, y la corriente inductora misma es la que lo imanta de manera intermitente[1].

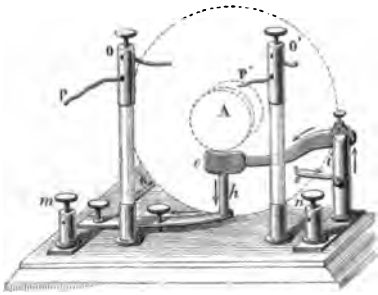


Fig. 919.

La corriente llega de la pila, por el alambre P, á un tope *a* (fig. 918), atraviesa el *conmutador* C (pieza accesoria que pronto describiremos) y luego penetra en fin por el tope *b* en el carrete de alambre grueso. De ahí sale por el alambre *s* (fig. 919), para entrar en el interruptor, donde sigue el circuito *ioh*, cerrado en *o* por el contacto del martillo y del yunque (fig. 918). Desde ahí se dirige al tope *e* por mediación de una lámina de cobre K, y finalmente al polo negativo de la pila por el alambre N.

El haz A se imanta desde que la corriente de la pila pasa por el alambre grueso y el martillo *o* es atraído; pero después, como el contacto se rompe entre *o* y *h*, la corriente queda interrumpida, la imantación cesa y el martillo vuelve á caer: luego, al pasar la corriente de nuevo, se repite la misma serie de fenómenos de modo que el martillo se pone á oscilar con gran rapidez, abriendo y cerrando alternativamente el circuito : á cada oscilación se producen en el alambre delgado dos fuerzas electromotoras de inducción, sucesivamente directas é inversas, y salta una serie de chispas entre sus dos extremos *pp*, suficientemente cercanas, que son los reóforos del carrete.

Observación. — Puede probarse que las dos cantidades de electridad inducidas en las dos fases de la oscilación son iguales, pero que la fuerza electromotora de la corriente directa es mayor que la

1. Para poner en acción los pequeños carretes, de 30 á 35 centímetros de largo, basta con 3 ó 4 elementos Bunsen de gran tamaño; para los grandes carretes, consideraba Ruhmkorff que se debe tomar una superficie de pila cuatro veces mayor.

de la inversa (1015). En efecto, si se pone un galvanómetro en el circuito inducido, no se observa ninguna desviación. Y si se separan los dos reóforos *pp'* (fig. 918), como la resistenca del aire se opone al paso de las corrientes, la que tiene mayor tensión, es decir la directa, es la que pasa en exceso, y después la que acaba por pasar sola, hasta una distancia límite en que ya no hay chispas: entonces no queda corriente inversa ni corriente directa; pero de P á P' se producen potenciales electrostáticos alternativamente de sentidos contrarios: esta es la inducción *en circuito abierto.*

1024. **Órganos accesorios del carrete de Ruhmkorff.** — *Condensador de Fizeau.* — M. Fizeau aumentó mucho la tensión de las corrientes inducidas, interponiendo en el circuito inductor un *condensador múltiple.* Compónese éste de hojas de estaño superpuestas y aisladas unas de otras por hojas de papel grueso *v* (fig. 920), más anchas que el estaño, que se han remojado en una disolución de resina. Las hojas de estaño desbordan sobre el papel de dos en dos, por una parte en *e, e', e''*... y por la otra en *s, s', s''*...; los estaños de orden impar reunidos por medio de una pinza, forman una armadura del condensador, y los de orden par constituyen la otra armadura. En los grandes carretes, la superficie de cada armadura alcanza de esta manera 20 metros cuadrados. Una de ellas está en comunicación con el tope *i*, que recibe la corriente á su salida del carrete, y la otra se encuentra en comunicación con el tope *m*, que á su vez está en contacto por medio de la lámina K con el conmutador C y luego con la pila. El condensador entero está contenido en la peana de madera que sostiene el carrete.

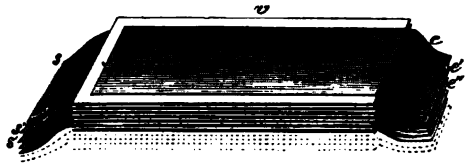


Fig. 920.

Para comprender el efecto del condensador, conviene recordar que en cada interrupción de la corriente inductora se produce una extra-corriente directa que en cierto modo lo continúa, prolonga su duración y, por tanto, debilita la tensión de la extra-corriente de apertura. Pero cuando el condensador está intercalado en el circuito inductor, esta extra-corriente carga de electricidad positiva la armadura que comunica con *i*, y de electricidad negativa la armadura que comunica con *m*. Pero estas electricidades contrarias se combinan en seguida, por medio del grueso alambre de la pila y del circuito CK*m*, dan origen á una corriente contraria á la de la pila, la cual desimanta instantáneamente el haz de hierro dulce: la corriente inducida es, pues, más corta, y por consiguiente más intensa. Los topes *m* y *n* colocados en la extremidad de la tableta, sirven para recoger la extra-corriente.

2°. *Conmutador de Ruhmkorff.* — El aparato está provisto de un pequeño *conmutador de mano* que permite, sea cambiar á voluntad el sentido de la corriente inductora en el carrete inductor, sea interrumpirla bruscamente.

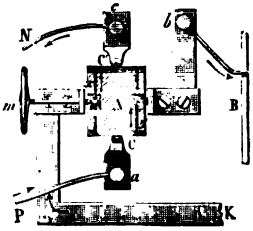


Fig. 921.

Este órgano es todo de cobre, menos el núcleo central A, que es un cilindro de boj (fig. 921); en los dos lados están fijos dos contactos de cobre C, C', donde descansan dos láminas elásticas de latón, unidas con los dos topes *a* y *c*, que reciben los reóforos de la pila. La corriente de ésta, que llega por *a* sube por C; desde ahí, por un tornillo *y* pasa al tope *b* y al carrete; después volviendo por la placa

K, que comunica con el martillo, va hasta C' por el tornillo x, baja por c y vuelve á la pila por el alambre N. Si se da vuelta por medio del botón m 180 grados al conmutador, es fácil ver que entonces ocurre lo contrario : la corriente llega al martillo por la lámina K y sale por b. Finalmente, si sólo se hace girar 90 grados, ya las placas elásticas dejan de apoyarse en los contactos C, C', y lo hacen sobre el cilindro de boj A, con lo cual se interrumpe la corriente.

1025. **Interruptor de mercurio (de Foucault).** — En los grandes carretes, el interruptor de martillo oscilante es insuficiente, porque las superficies de contacto se calientan entonces hasta soldarse; además, la chispa que salta entre el yunque y el martillo disminuye la instantaneidad de las interrupciones y por consiguiente, la intensidad de los efectos. Foucault imaginó un *interruptor de mercurio* que no presenta este inconveniente.

En dos cápsulas de vidrio u y v, que contienen mercurio cuya superficie está cubierta por una capa de alcohol (fig. 922), penetran dos vástagos de platino c y d, fijos en el mismo brazo de una palanca AB, cuyo otro brazo sostiene una armadura de hierro dulce A, solicitada por un electroimán E. La palanca AB está sostenida por un vástago l, montado á su vez en una lámina elástica de acero

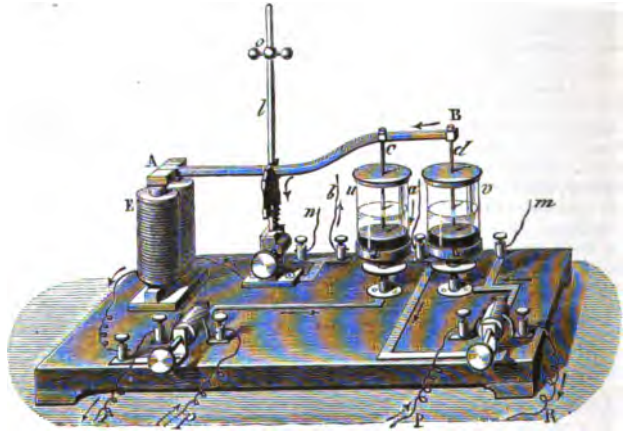


Fig. 922.

que puede oscilar libremente á izquierda y derecha, transmitiendo su movimiento á la palanca y á los vástagos c y d. La lámina y la palanca pueden ser levantadas más ó menos con una barra dentada y un piñón. Estas piezas se encuentran montadas todas en una tabla ó peana con dos conmutadores de mano y con diferentes conductores.

En su origen, los vástagos de platino penetran en el mercurio, y por el alambre p se hace llegar al conmutador correspondiente la corriente de una *pequeña pila auxiliar*, distinta de la que produce la corriente inductora. La corriente llega á la cápsula u, pasa por la palanca BA y la lámina de acero, y desde ahí al alambre del electroimán, de donde vuelve al mismo conmutador y luego á la pila por el alambre r. Como entonces es atraída la armadura A, la lámina oscila hacia A, los vástagos c y d dejan de estar en contacto con el mercurio, la corriente deja de pasar, y el electroimán cesa de actuar; pero la lámina elástica oscila inmediatamente en sentido contrario, los vástagos de platino bajan y la corriente circula de nuevo. Prodúcense de 50 á 60 oscilaciones por segundo. Puede retardarse ó acelerarse su velocidad, elevando ó bajando una masa o que corre á lo largo del vástago l.

Estas son las oscilaciones que se utilizan para interrumpir la corriente inductora. Esta llega por P al segundo conmutador, penetra en la cápsula v, pasa al vástago d, á la palanca, á la lámina de acero, y desde ahí al alambre b, que la

lleva al alambre grueso del carrete. Pero se observa que cada oscilación de la palanca AB hace salir la punta *d* del mercurio y produce una interrupción en el circuito inductor.

Observaciones. — 1° Los alambres *m* y *n* están en comunicación con los topes *m* y *n* del carrete (fig. 918), es decir, con las dos armaduras del condensador.

2°. El alcohol no tiene como único efecto oponerse á la elevación de temperatura por la chispa de ruptura, sino que también sirve para impedir la oxidación en los puntos donde aquélla salta, suprimiendo el contacto con el oxígeno del aire.

3°. Es evidente que se puede suprimir todo interruptor y lanzar en el alambre inductor una corriente primaria, de intensidad variable, procedente de un *alternador* cualquiera.

1026. **Transformadores : tipo Zypernowski.** — La energía eléctrica que llega al circuito primario del carrete de Ruhmkorff posee de ordinario escasa fuerza electromotora y gran intensidad : es transformada en energía eléctrica que circula en el circuito secundario en escasa intensidad y gran fuerza electromotora.

Dirigiendo por el contrario al circuito secundario una corriente de pequeña intensidad y gran fuerza electromotora, se recogería en el otro circuito una corriente de gran intensidad y de escasa fuerza electromotora. El producto EI permanecería sensiblemente constante en la transformación.

Todo aparato capaz de transformar de este modo las cualidades de la energía eléctrica se llama *transformador*.

Uno de los más conocidos es el tipo Zypernowski (fig. 923). Compónese de un núcleo interior formado por discos anulares de palastro consolidados por medio de marcos que, con los dos platillos exteriores de hierro, constituyen la armadura del aparato. Los carretes están arrollados sobre los segmentos anulares entre los marcos. Las extremidades de los circuitos eléctricos están atadas en topes fijos al platillo superior por medio de discos de porcelana. Los empalmes con los alambres exteriores se efectúan por medio de bandas de estaño que se funden cuando se produce un circuito corto.

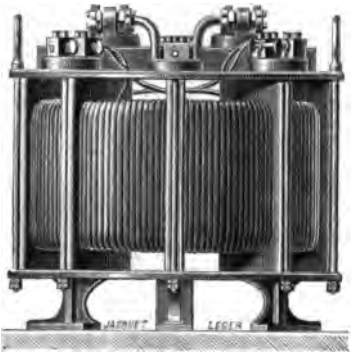


Fig. 923.

En otros tipos, los circuitos primario y secundario están arrollados formando el anillo; entonces el núcleo de hierro está constituído por un alambre arrollado en este anillo.

1027. **Efectos del carrete de Ruhmkorff.** — El carrete de Ruhmkorff puede producir efectos *fisiológicos*, *caloríficos*, *químicos*, *luminosos* y *mecánicos* análogos á los de una batería eléctrica sumamente potente.

Efectos fisiológicos. — Son tan intensos que las conmociones de los carretes medianos, aun cuando la corriente inductora proceda de un solo par de Bunsen, son ya insoportables. Con dos pares de Bunsen se mata un conejo, y con un gran número de pares un hombre caería como herido por el rayo.

Efectos caloríficos. — Obsérvaseles fácilmente interponiendo entre los reóforos P, P' (fig. 918) un alambre de hierro muy delgado : éste se funde y arde con viva luz. Dichos efectos se han utilizado en el cohete Stateham (1029).

Efectos luminosos. — Estos efectos son muy variados, según que ocurren á la presión ordinaria, ó en gases muy enrarecidos, ó en vapores de muy escasa tensión.

En el aire consisten en una serie de chispas vivas y ruidosas, cuya longitud llega hasta 45 centímetros con el carrete grande de 65 centímetros de largo.

En el aire muy enrarecido son notabilísimos los efectos. Se les obtiene con facilidad uniendo los reóforos P y P' del carrete con los dos vástagos del huevo

eléctrico ya descrito. En el vacío á 1 ó 2 mm. se ve un hermoso reguero luminoso que va de una bola á otra, de manera sensiblemente continua (fig. 926). Si entonces se acerca la mano al huevo, se produce (fig. 924) por influencia una desviación de la luz eléctrica.

El polo positivo de la corriente inducida es el que presenta mayor brillo: su luz es roja color de fuego, mientras que la del polo negativo es escasa y violada;

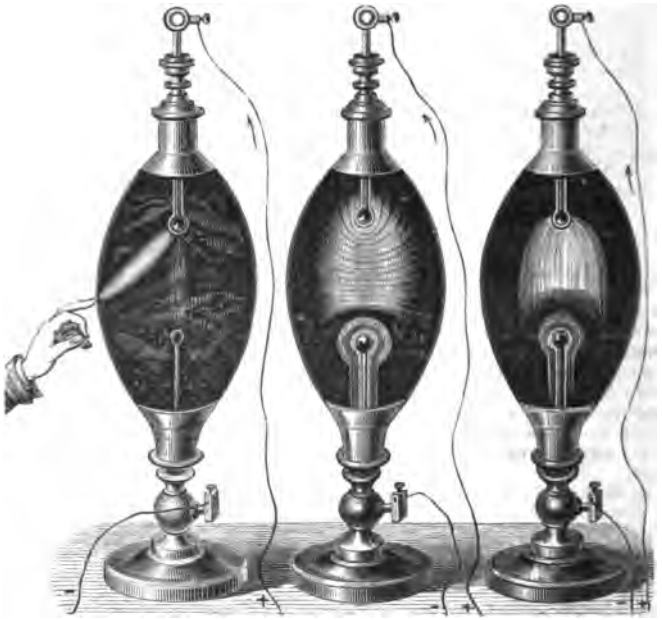


Fig. 924. Fig. 925. Fig. 926.

además, esta última se prolonga por toda la longitud del vástago negativo, fenómeno que no se produce en el polo positivo (fig. 925).

Efectos mecánicos. — También se pueden obtener efectos mecánicos poderosos. Con el carrete grande de 65 centímetros, se taladra una masa de vidrio de cinco centímetros de grueso. Entonces se dispone según indica la figura 927 la placa que se trata de horadar.

En el caso de que la placa de vidrio V presente demasiada resistencia, es de temer que la chispa salte en el carrete mismo agujereando la capa aisladora que separa los alambres, y entonces el carrete quedaría inservible. Para evitar este accidente, se disponen dos alambres *e* y *c* que ponen en comunicación los polos del carrete con dos vástagos metálicos horizontales, más ó menos distantes uno de otro. Entonces, si la chispa no puede saltar en V horadando el vidrio, se produce de *m* á *n* y el carrete no sufre daño.

Efectos químicos. — MM. Ed. Becquerel y Fremy han probado los efectos químicos del carrete de Ruhmkorff haciendo saltar las chispas entre los extremos de dos alambres de platino que atraviesan las paredes de un tubo de vidrio lleno de aire y herméticamente cerrado. De esta manera se ve que el oxígeno y el nitrógeno del aire se combinan lentamente, produciendo ácido nitroso. En este caso, los efectos químicos de la chispa se complican con otros caloríficos ó mecánicos. Este inconveniente desaparece en la descarga silenciosa llamada *efluvio eléctrico.*

Carga de las baterías. — El carrete de Ruhmkorff puede utilizarse también para

cargar las botellas de Leyden, y aun baterías de varias jarras. Entonces es necesario practicar, en uno de los alambres que ponen en comunicación las arma-

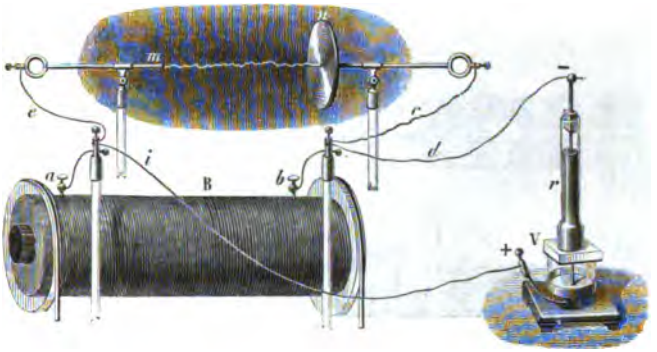


Fig. 927.

duras de la batería con los polos del carrete, una interrupción que no dé paso más que á la corriente directa. Poniendo por otra parte la batería en comunicación con los dos vástagos de una botella de Lane, se puede calcular el rendimiento de los carretes de Ruhmkorff en condiciones definidas.

1028. **Efluvio eléctrico.** — Llámase *efluvio eléctrico* al paso silencioso, y sin calor aparente, de la electricidad á través de un medio gaseoso.

I. *Efectos químicos del efluvio.* — *Experiencias de M. Berthelot.* — Al pasar á través de los gases en forma de efluvio, la electricidad da origen á notables reacciones químicas, que dependen en gran parte de la forma bajo que actúa la descarga. M. Berthelot ha efectuado estudio profundo de estos efectos, descubriendo sus leyes experimentales.

II. *Efectos luminosos.* — 1°. *Tubos de Geissler.* — Cuando se hace pasar la descarga del carrete por tubos de vidrio que contengan un vapor ó un gas muy enrarecido, la luz eléctrica aparece en forma de zonas (ó *estratos*) alternativamente brillantes y oscuros, que forman como una pila de luz entre los dos eléctrodos Estos fenómenos, que han sido estudiados por Masson, Grove, Gassiot, Plücker, etc., se producen en tubos cerrados, de vidrio ó de cristal, que Geissler imaginó. Introdúcese en ellos un gas ó un vapor; después, antes de cerrarlos, se hace allí el

Fig. 928.

vacío, con medio milímetro de aproximación. En los dos extremos de los tubos se sueldan dos alambres de platino, que penetran en ellos 1 á 2 centímetros, y que se ponen en comunicación con los polos del carrete de Ruhmkorff. Las estrías luminosas varían de forma, de color y de brillo, con el grado del vacío, la naturaleza del gas ó del vapor, y las dimensiones de los tubos. Con frecuencia presenta el fenómeno aun más hermosura por la fluorescencia que la descarga eléctrica excita en el vidrio.

La figura 928 representa las estrías producidas por el hidrógeno, á medio mili-

metro de presión en un tubo alternativamente ensanchado y estrecho : en las bolas, la luz es blanca ; en las partes capilares, es roja.

La figura 929 hace ver las estrías en el ácido carbónico á un cuarto de mili-

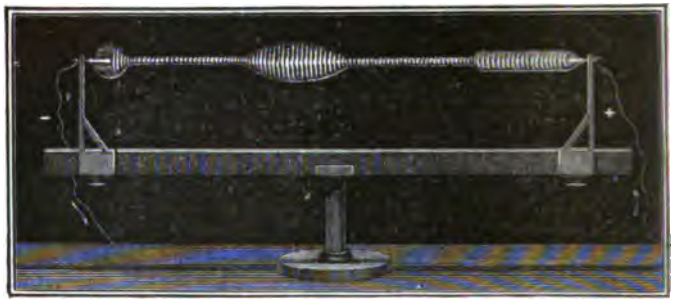


Fig. 929.

metro de presión : el color es verdoso, y las estrías no tienen la misma forma que en el hidrógeno. En el nitrógeno, la luz es amarillo-roja.

2°. *Experiencias de Crookes.* — Las experiencias de Crookes sobre el bombardeo molecular por las descargas eléctricas en un gas sumamente enrarecido se realizan fácilmente con el carrete de Ruhmkorff, bastando unir los polos de éste con los alambres de platino soldados en las paredes de la ampolla de vidrio, donde se hace el vacío con la trompa de Sprengel.

3°. *Experiencias de Plücker.* — Plücker ha probado que la luz de los tubos de Geissler no depende de la sustancia de los eléctrodos, sino de la naturaleza del gas ó del vapor que hay en el tubo. Ese físico observó también que las luces suministradas por el hidrógeno, el nitrógeno, el ácido carbónico, etc., examinadas en el espectroscopio, suministran espectros muy diferentes.

1029. **Aplicación del carrete de Ruhmkorff. — Cohete de Stateham.** — Cuando un alambre de cobre AB (fig. 930) está forrado de gutapercha sulfurada, fórmase al cabo de algunos meses, en el contacto del metal y de su envoltura, una capa de sulfuro de cobre que basta para transportar la corriente. En efecto, si en una parte cualquiera del circuito se corta la mitad superior de la envoltura, y si después se quita en la cortadura *ab* así formada un pedazo del alambre de cobre de

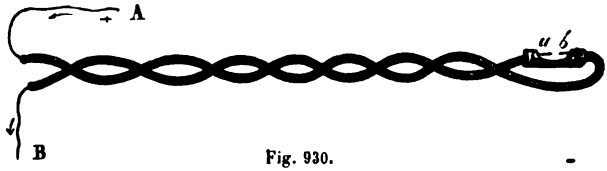


Fig. 930.

6 milímetros de largo, la corriente intensa lanzada por este alambre y que se ha interrumpido, pasa sin embargo á través del sulfuro adherente á la gutapercha y lo pone en ignición. Y si en la cavidad así practicada se pone algodón pólvora ó pólvora común, según hizo el ingeniero Stateham, este cuerpo se inflama apenas se lanza la corriente : por eso recibe este dispositivo el nombre de *cohete de Stateham.*

En vez de la corriente intensa de una pila muy poderosa, se puede emplear un carrete de Ruhmkork. La descarga del carrete entre los puntos *a* y *b* basta para inflamar el cohete. Se le utiliza en la industria ó en el arte militar para inflamar las minas á gran distancia.

CAPÍTULO XII

NUEVAS APLICACIONES DE LA INDUCCIÓN. — EFECTOS DE CAPACIDAD Y DE INDUCCIÓN REFLEJA : DESCARGAS OSCILANTES.

1030. **Descargas oscilantes. — Definiciones.** — La teoría de la inducción, aplicada á la descarga de los condensadores, prueba que esta descarga puede ser *continua*, quiere decir, de sentido constante, ó bien *oscilante*. Esto depende de la capacidad del condensador así como de la resistencia y de la inducción refleja del circuito de descarga. Es posible representar por una curva característica (fig. 931) la fisonomía de la descarga oscilante : los tiempos se cuentan en el eje de las abscisas y las intensidades como ordenadas.

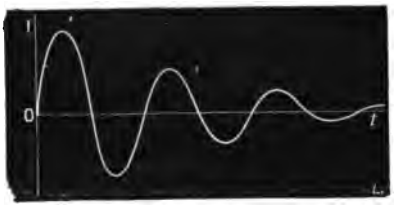


Fig. 931.

Obsérvase que la oscilación está constituída por dos descargas sucesivas de sentidos contrarios, y que esta ida y este regreso de la corriente tienen *duración constante*, mientras que la intensidad máxima de cada oscilación va disminuyendo cada vez más. Nótase un fenómeno análogo produciendo, por aspiración ó compresión, un desnivel entre las dos ramas de un tubo en U que contengan un líquido y abandonándolo á sí mismo : éste no recobra su posición de equilibrio sino después de una serie de oscilaciones de amplitudes progresivamente decrecientes.

1031. **Experiencias de Feddersen y de M. Lodge.** — Si se examina por medio de un espejo giratorio la chispa producida por una descarga de esa clase, se nota en efecto una serie de rasgos luminosos paralelos y distintos cuyo brillo va disminuyendo. Este modo de estudio se debe á Feddersen. El período de la descarga es variable con las circunstancias de la experiencia.

Modificando convenientemente la capacidad del condensador, la resistencia y la inducción refleja del circuito de descarga, obtuvo M. Lodge una gama de vibraciones eléctricas cuyos períodos iban desde *un cien millonésimo* á un *cinco-centésimo* de segundo.

1032. **Experiencias de M. Paalzow.** — M. Paalzow probó terminantemente, operando la descarga en un tubo de Geissler dispuesto paralelamente á los polos de un electroimán, que aquélla es de naturaleza oscilante.

Fig. 932.

En efecto, los dos polos, actuando sobre el resplandor que atraviesa el tubo, producen en sus dos mitades una acción contraria y le dan la forma de una S (fig. 932). Si la dirección del resplandor cambia de sentido pasará lo mismo con la S, porque la parte desviada hacia arriba se encontrará entonces desviada hacia abajo. La sucesión rápida de las descargas, dirigidas alternativamente en un sentido y en otro, producirá por consiguiente un 8 luminoso, que puede ser contemplado al mismo tiempo por un auditorio numeroso.

1033. **Experiencias de M. Hertz.** — Las oscilaciones eléctricas producidas según acaba de explicarse, se propagan en el aire ambiente como si se tratara de ondas sonoras.

Para demostrarlo se puede utilizar uno de los aparatos imaginados por M. Hertz (fig. 933). La capacidad está constituída por dos placas rectangulares de cobre PP' provistas de vástagos metálicos, cuyas bolas extremas *b* pueden acercarse ó alejarse á voluntad. Se le carga por medio de un carrete de Ruhmkorff. La descarga oscilante se efectúa entre las bolas *b*. Explorando el espacio por medio de un conductor especial, constituído, ya por un alambre encorvado en forma de círculo y que presenta pequeña interrupción (fig. 934), ya por un alambre rectilíneo interrumpido en b_1 (fig. 935), se observa que en la interrupción b_1 saltan sin interrupción chispas cuando la distancia de las dos bolas del aparato está convenientemente elegida.

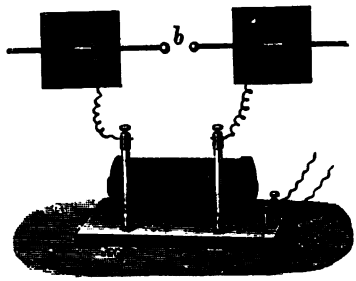


Fig. 933.

Estos aparatos, que revelan las ondas eléctricas como los resonadores de Helmholtz ponen de manifiesto las ondas sonoras, se han llamado por analogía *resonadores eléctricos*.

En el resonador Vb_1 (fig. 935), el juego del tornillo V permite disminuir ó aumentar la interrupción. Además, puede hacerse variar su capacidad colgando hojas de estaño *p* y *p'* en las dos ramas.

Reflexión é interferencia de las ondas eléctricas. — Las ondas eléctricas son detenidas en su camino por una superficie conductora que está en comunicación con el suelo. En vez de continuar su camino, se reflejan hacia su dirección primitiva; entonces pueden interferir con las ondas incidentes, según el mecanismo ya explicado en acústica y en óptica.

Fig. 934.

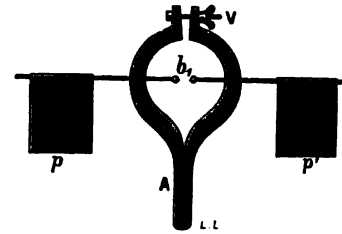


Fig. 935.

Refracción de las ondas eléctricas. — M. Hertz ha puesto también de manifiesto la refracción de las ondas eléctricas sirviéndose de un prisma grande de asfalto de 30°.

1034. **Experiencias de M. Tesla.** — M. Tesla ha realizado también experimentos sumamente curiosos con las descargas oscilantes, por medio de un aparato especial. — Este se compone (fig. 936) de un carrete de Ruhmkorff R de vibrador, alimentado, sea por una batería de acumuladores, sea de otro modo. Este carrete carga una botella de Leyden ordinaria, ó una batería C, cuya descarga oscilante se efectúa á través de algunas espiras de alambre grueso. Esta descarga induce entonces una corriente oscilante de corto período, en un alambre largo y fino *b* arrollado en un mango de vidrio cuyo eje sirve de dirección para introducir el circuito inductor. El carrete, construído según el modelo de Elihu Thomson, está sumergido en una artesa rectangular de vidrio llena de aceite del que se usa para dar grasa á las máquinas. Los extremos del circuito de alambre fino están en I', el circuito de descarga tiene una interrupción I situada entre los polos de un poeroso electroimán, que tiene por función desvanecer la chispa. He aquí los principales experimentos :

1°. M. Tesla realiza los mismos efectos que Crookes poniendo en comunicación una ampolla vacía con *uno solo* de los polos del carrete de descarga.

2° Poniendo dentro de la ampolla un hilito de carbón ó de platino, y más ge-

neralmente un cuerpo cualquiera, este cuerpo constituye una verdadera lámpara eléctrica *unipolar*.

3°. Terminando el hilito en una esfera de carbón ó mejor en una pequeña copa llena de sustancias fosforescentes, fragmentos de rubí, blenda hexagonal, ittria, sulfuro de calcio, carburendum, etc., obtiene *iluminación muy viva*.

4°. Acercando la mano se aumenta la capacidad de la lámpara y por consiguiente su brillo. Poniendo sobre la ampolla una hoja metálica á que se puede

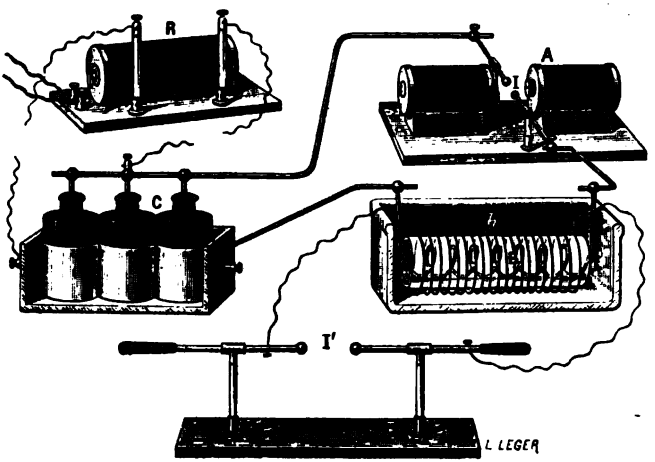


Fig. 936.

dar forma de capillo para hacer mayor la ilusión, se produce el efecto de una pantalla.

5°. La *iluminación de un tubo enrarecido sin eléctrodos* es la experiencia más típica de la serie; he aquí como la realiza M. Tesla:

Una hoja metálica de unos 3 metros de largo por 0,33 m. de ancho, suspendida á 2,5 m. sobre el suelo, se pone en comunicación con uno de los polos del carrete; el otro polo comunica con el suelo. En todo el espacio comprendido entre el suelo y la hoja metálica, el carrete mantiene un campo electrostático vibratorio cuyas líneas de fuerza son sensiblemente verticales. Si se toma un tubo enrarecido en la mano — los que usa M. Tesla tienen próximamente 1 metro de largo — y se le coloca paralelamente á las líneas de fuerza, *se ilumina en toda su longitud con resplandor cárdeno*. Si se inclina el tubo cada vez más, el resplandor disminuye, y se anula por completo cuando se le dirige perpendicularmente á las líneas de fuerza del campo. Apágase también el tubo por la interposición de una pantalla escasamente conductora, ó bien cogiéndolo por sus dos puntas.

Si se acerca una de las manos á la otra, toda la parte del tubo comprendida entre las dos manos permanece oscura: la porción libre es la única que se ilumina con resplandor tanto más vivo cuanto más corta es.

Suprimiendo la armadura metálica se puede iluminar también el tubo, pero hay que acercar la mano libre á uno de los polos del carrete.

Aplicación. — Concíbese que disponiendo una frente á otra dos anchas hojas de metal, situadas, pongamos por ejemplo, en las dos fachadas opuestas de una calle, y que comuniquen respectivamente con los dos polos del carrete, tubos enrarecidos dirigidos transversalmente se iluminarían: esto basta para que se pueda pensar en un nuevo modo de alumbrado ó por lo menos en un nuevo método de comunicación á distancia.

6°. También las descargas en el aire atmosférico presentan interesantes particularidades.

Prodúcese en uno de los polos un penacho luminoso y continuo, que presenta

la apariencia de una verdadera llama, cuando se hace comunicar al otro polo con un cuerpo de capacidad conveniente.

Terminando los alambres secundarios del carrete en dos discos, entre los cuales se intercala una placa de ebonita, ésta, en vez de oponerse al paso de la descarga, la aumenta y se calienta por su acción.

Citemos finalmente la radiación en toda su longitud de alambres desnudos ó forrados con un aislador, fijós en los polos del carrete.

1035. **Efectos fisiológicos de las descargas oscilantes.** — Una de las particularidades más imprevistas de estas descargas oscilantes de período muy corto es que *carecen de acción* sobre el organismo : es posible coger *impunemente* con las manos los dos polos del carrete. Sin embargo, conviene tocar los topes por medio de masas metálicas que se cogen con cada mano, á fin de evitar las quemaduras por las chispas que saltan en el momento del contacto.

Observación. — *Experiencias de M. d'Arsonval.* — M. d'Arsonval había dado á conocer en Francia, cuando aun no conocía los trabajos del norte-americano Tesla, esta propiedad inesperada de las descargas de gran frecuencia.

1036. **Experiencias de Elihu Thomson.** — M. Elihu Thomson ha puesto de manifiesto la influencia del coeficiente de inducción refleja mediante nuevo experimento tan curioso como los anteriores.

Un carrete B (fig. 937), alimentado por una corriente alterna, se encuentra rodeado por un anillo de cobre ó, mejor aun, de aluminio. Entonces se observa, no sólo la elevación de la temperatura del anillo ó la iluminación de una lámpara intercalada en el circuito de una espira de alambre, — lo que constituye consecuencia inmediata de la inducción, — sino también una *repulsión* del anillo. Si la inducción siguiera exactamente la corriente inductora (fig. 938), habría en el transcurso de un período, una repul-

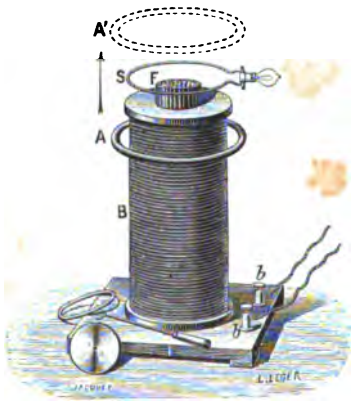


Fig. 937.

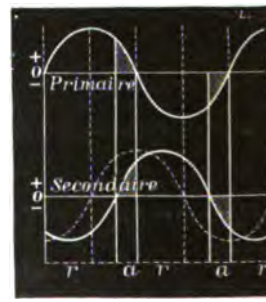


Fig. 938.

sión media igual á la atracción media : de donde se deduce que el anillo quedaría en reposo. Pero como la inducción refleja resiste á la circulación de la corriente en el anillo, produce un retraso, una falta de enlace entre las dos corrientes, tanto que la duración de la repulsión aumenta relativamente á la de la atracción. Las partes sombreadas de la figura 938, que representa en el mismo instante las intensidades de las corrientes inductora é inducida, corresponden en efecto á la atracción, esto es á una concordancia de sentido entre las corrientes alternas, inductora é inducida.

CAPÍTULO XIII

APLICACIONES DEL ELECTROMAGNETISMO Y DE LA INDUCCIÓN.

—

MÁQUINAS Y MOTORES ELECTROMAGNÉTICOS.

1037. **Definiciones.** — Dase el nombre genérico de *máquinas electromagnéticas* á unos aparatos que transforman el trabajo mecánico en energía eléctrica por medio de la inducción magneto-eléctrica : según que la inducción se debe á imanes permanentes ó á electroimanes, así se llaman las máquinas *magneto-eléctricas* ó *dinamo-eléctricas*. Las corrientes producidas pueden ser *alternas* ó *continuas*.

En el primer caso, las corrientes se suceden, siendo *alternativamente directas* é *inversas*. Los aparatos que engendran estas corrientes se llaman *máquinas de corrientes alternas*[1] y también á menudo *alternadores*.

Es posible arreglar las cosas de manera que las corrientes sean siempre del mismo sentido en el circuito exterior. Basta con poner á la máquina un *conmutador* que cambia automáticamente el sentido exterior de la corriente cada vez que la máquina cambia por su parte, es decir en todos los semi-períodos. Entonces las corrientes atraviesan el circuito exterior en el mismo sentido, pero con intensidad que varía continuamente.

Las máquinas provistas de este sistema conmutador se llaman *de corrientes enderezadas*.

Las máquinas de *corrientes continuas* engendran corrientes cuyo sentido no cambia y cuya intensidad es constante (ó prácticamente tal). Tienen pues las mismas propiedades que las suministradas por las pilas.

Los *motores electromagnéticos* son máquinas que por el contrario transforman la energía eléctrica en trabajo mecánico. Esta transformación inversa puede efectuarse valiéndose de los mismos órganos que la transformación directa : lo cual se expresa diciendo que las máquinas electromagnéticas son *reversibles*.

1038. **Generalidades sobre las corrientes alternas.** — *Período* y *Frecuencia*. — Las dos corrientes opuestas sucesivas varían respectivamente con arreglo á una ley representada por un seno, y recobran periódicamente el mismo valor y el mismo sentido. Por ejemplo, la corriente, que parte de la intensidad cero (fig. 939), crece hasta cierto máximum, disminuye después, cambia de sentido pasando por cero, recobra el mismo valor máximo pero en sentido contrario y acaba por volver á cero. El tiempo que transcurre entre dos regresos de la corriente al mismo estado se llama su *período*. Dase el nombre de *frecuencia* de una corriente alterna al número de períodos por segundo. Esta frecuencia varía de 40 á 133 períodos por segundo en los tipos usados generalmente. Un diapasón que vibrara sincrónica-

1. Se dice indiferentemente *máquina de corrientes alternas* ó de *corriente alterna*. La última expresión da idea de la continuidad del efecto, por más que el valor y el sentido cambien.

mente con la corriente de esta última máquina emitiría una nota cercana al do_2.

La figura 939 representa en la línea llena una corriente alterna sin enderezamiento y en la puntuada una corriente enderezada.

Intensidad media y fuerza electromotora media. — Es claro que no se puede hablar de la intensidad de una corriente alterna sin precisar el instante en que se la considera. La cantidad de electricidad inducida durante un semi-periodo (fig. 939) es igual á $\Sigma I \Delta t$, es decir, al área limitada por la curva y el eje de los tiempos entre dos ceros consecutivos. Esta área, dividida por la duración del semi-periodo, indica el valor de lo que se llama la *intensidad media* de la corriente alterna. Para una corriente sinusoidal (fig. 939), se encuentra

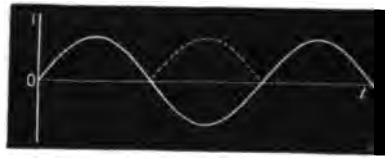


Fig. 939.

$$I_{moy} = \frac{2\,I_{max}}{\pi}. \quad \text{Se tiene análogamente} \quad E_{moy} = \frac{2\,E_{max}}{\pi}.$$

Intensidad eficaz y fuerza electromotora eficaz. — Es preferible introducir la noción de *intensidad eficaz* y de *fuerza electromotora eficaz*. Si se llevara á las ordenadas (fig. 939), no ya la intensidad I, sino su cuadrado I^2, el producto $r\Sigma i^2 dt$ del área de una espira por la resistencia del circuito, representaría el calor emitido por el circuito. La intensidad de una corriente constante, que produjera en el circuito el mismo desprendimiento de calor en tiempo idéntico, se llama *intensidad eficaz* de la corriente alterna. Para una corriente sinusoidal

$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}, \quad \text{del mismo modo se tiene} \quad E_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Cuando se habla, sin precisar más, de la intensidad y de la fuerza electromotora de una corriente alterna, hay que subentender que se trata de la intensidad y de la fuerza electromotora eficaces.

1039. Máquina de Clarke. — El primer aparato de este género realizado en forma práctica fue la máquina de Clarke modelo y punto de partida de todas las demás. Vamos á describirla detalladamente.

1°. *Historia.* — *Máquina de Pixii.* — El descubrimiento de la inducción por Faraday ocurrió en 1830. Ya en 1832, Pixii, constructor de aparatos de física en París, combinó un ingenioso aparato para realizar las experiencias de Faraday. Esta fué la primera máquina magneto-eléctrica, que Clarke modificó y perfeccionó.

El aparato de Pixii se componía de un carrete doble de alambre de cobre, en forma de electroimán, que estaba fijo verticalmente en una armadura de madera, y de un grueso imán permanente, en forma de herradura, dispuesto para girar polo contra polo delante de los centros del carrete. Por fin, llevaba un pequeño *conmutador*, destinado á enderezar las corrientes inducidas alternas.

Máquina de Saxton. — La práctica no tardó en demostrar que era inútil servirse de un carrete inducido tan pesado como el de Pixii, al paso que había ventaja en aumentar la masa y, por consiguiente, el campo del imán inductor. Por otra parte, invirtiendo la proporción de los pesos de ambos órganos, inductor é inducido, era natural invertir su mecanismo, fijando el más pesado y dando movilidad al más ligero. Así lo efectuó Saxton, quien combinó un nuevo modelo de máquina de carretes horizontales, que puede girar delante de los polos de un imán fijo y recostado horizontalmente punta contra punta. Clarke realizó el mismo perfeccionamiento tomando también un carrete móvil y horizontal, pero con imán fijo no dispuesto punta contra punta sino verticalmente.

2°. *Descripción.* — El imán inductor es un haz imantado A (fig. 940) encorvado á modo de herradura; se le adapta verticalmente en una tableta. Delante está el *doble* carrete inducido B, B', móvil en torno de un eje horizontal. Las dos mitades de este circuito están arrolladas en dos cilindros de hierro dulce unidos entre sí por su extremi-

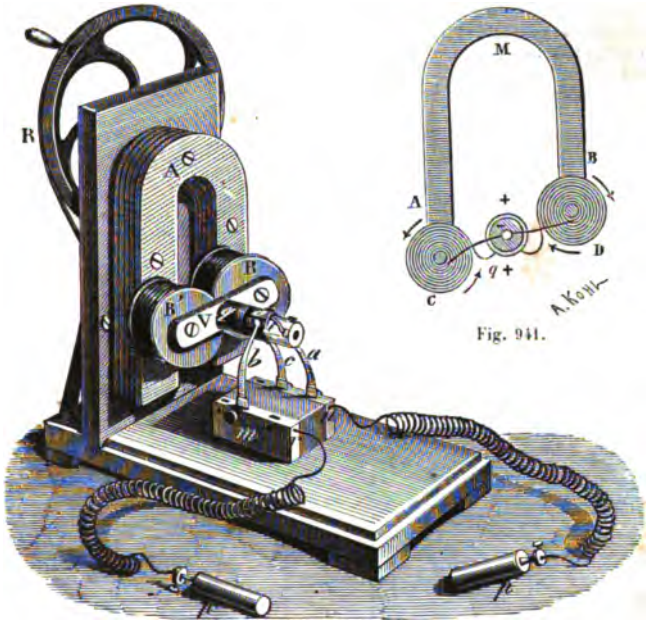


Fig. 941.

Fig. 940.

dad anterior, mediante una gruesa placa de hierro dulce V y en la otra, frente al imán, por una placa de latón. En esta última se halla fijo el eje del carrete provisto de una polea que es movida por medio de una correa sin fin, maniobrada por la gran rueda de manubrio R. Prolóngase anteriormente en un cilindro de cobre, fijo en la placa de hierro dulce y que lleva el *conmutador*.

Cada carrete está formado por un alambre de cobre muy fino, forrado de seda y que da 1500 vueltas. Las dos puntas anteriores de los alambres de los carretes van á soldarse con el eje (fig. 941), y las otras dos con una pieza de cobre *q*, fija en dicho eje, pero aislada de él gracias á un cilindro de marfil V. Para que la corriente inducida sea del mismo sentido en las extremidades que se reunen, tiénese cuidado de arrollar los alambres en sentidos contrarios en los dos carretes.

3°. *Generación de la corriente.* — Las corrientes que se producen en los carretes BB' se deben á dos causas: 1°. á la inducción magneto-eléctrica por movimiento;

2°. á la inducción magneto-eléctrica por variación de magnetismo. Esta última es con mucho la más poderosa.

Sigamos á uno de los carretes, B por ejemplo, en su movimiento delante de los polos del haz imantado. Convengamos en representar por *a* y *b* los polos de éste, y por *a'*, *b'* los que adquiere sucesivamente la extremidad del núcleo de hierro. Consideremos el instante en que el carrete pasa por delante del polo norte *a* del haz (fig. 942, I); la extremidad del núcleo próxima al polo norte del imán tiene entonces un polo sur en que las corrientes de Ampère están dirigidas en el sentido de las agujas de un reloj [1]. Estas corrientes inducen en el alambre del carrete corrientes directas; pues como el carrete se aleja del polo *a*, la intensidad de su magnetismo (ó de sus corrientes particulares) va disminuyendo de manera

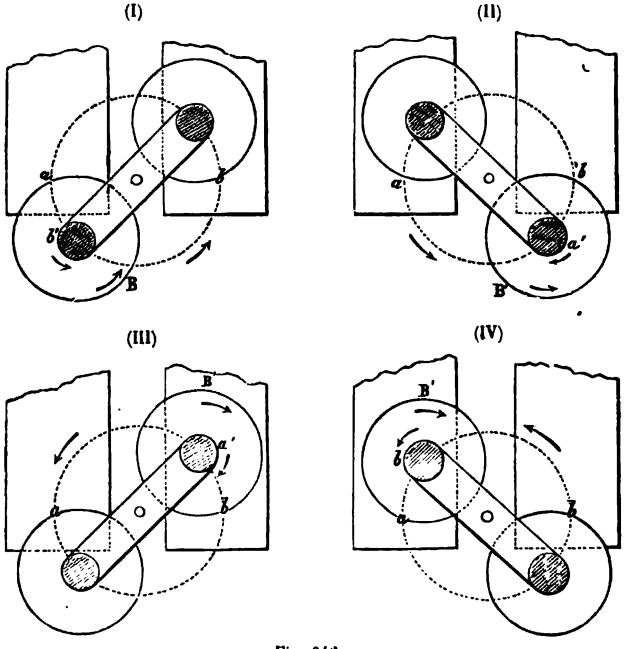


Fig. 942.

continua; entonces la corriente inducida conserva siempre el mismo sentido, hasta que la recta que une los ejes de los carretes sea perpendicular á la línea de los polos *a* y *b* del haz. Á partir de este momento, el núcleo se acerca al polo *b* y se imanta en sentido contrario, y el extremo, que era sud durante el primer cuarto de revolución, se convierte en un polo norte *a'* (fig. 942, II). Pero entonces las corrientes de Ampère se dirigen en el sentido de la flecha *a'*, y como empiezan, desarrollan en el alambre del carrete una corriente inducida inversa, que resulta ser del mismo sentido que la precedente. Además, esta segunda corriente se sobrepone á la primera, puesto que se acerca á *b* al mismo tiempo que el carrete se aleja de *a*. En resumen, durante la semi-revolución inferior de *a* á *b*, el

1. Lo contrario es lo indicado por la flecha *b'*, porque los carretes han llegado aquí como en la figura 940, esto es, por detrás y no por delante : habría que mirarlos por el extremo que roza con el imán para que las corrientes de Ampère parecieran girar en el sentido de las agujas de un reloj.

alambre del carrete ha sido recorrido sucesivamente por dos corrientes inducidas del mismo sentido que se pueden considerar como constitutivas de una corriente única, por causa de la rapidez de su superposición.

El mismo razonamiento hace ver que durante toda la semi-revolución superior (fig. 942, III y IV) el alambre es recorrido también por dos corrientes inducidas sucesivas del mismo sentido, y que sólo forman una corriente única, inversa de la precedente.

Cuanto se acaba de decir del carrete B se aplica evidentemente al B' y, gracias al modo de estar arrollados las alambres, ambos son recorridos durante cada semi-revolución inferior por una corriente del mismo sentido, que cambia para ambos durante la semi-revolución superior.

Observación. — Considerando los imanes como solenoides y aplicando en este caso la ley de Lenz (1011), se observa que inducen á su vez en los carretes por cambio de posición corrientes del mismo sentido que las anteriores. Este efecto de inducción directa existe en todas las máquinas magneto-eléctricas que se van á describir.

4°. *Conmutador de Clarke.* — Todo conmutador de corrientes alternas está construído según el principio siguiente: *Atar los reóforos del circuito exterior, no del carrete inducido, sino de dos frotadores fijos, tales como las láminas* b *y* c (fig. 940), *á los cuales van á aplicarse sucesivamente en cada inversión de la corriente los polos contrarios del circuito inducido.* Se ha construído gran número de conmutadores que todos son variedades del de Clarke. Compónese de un cilindro aislador de marfil ó de boj J, en cuyo eje hay un cilindro de cobre *k* (fig. 943), de menor diámetro, fijo en la armadura V y que gira con los carretes. Sobre el cilindro de marfil hay primeramente una anilla *q*; después, algo más lejos, dos medias anillas *o*, *o'*, de latón, completamente aisladas una de otra. La media anilla *o'* comunica con lel eje *k* por un tornillo *r*, y la media anilla *o* con la anilla *q* por una engüeta *x* que las une. Finalmente, las caras laterales de un pedazo de madera sostienen dos placas de latón *m*, *n*, donde están mantenidas, por medio de tornillos de presión, dos láminas elásticas de latón *b* y *c*, que se apoyan sucesivamente sobre las semi-anillas *o* y *o'* durante la rotación. De manera que las piezas *o*, *o'* son en cierto modo los polos de las corrientes inducidas alternas y estos polos son á su vez alternativamente positivos y negativos.

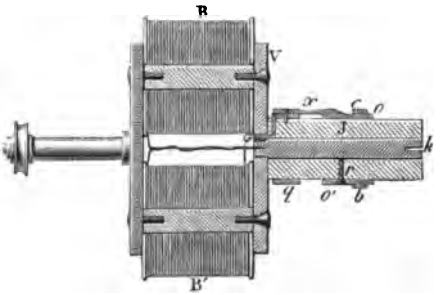


Fig. 943.

Ahora bien, si se considera el instante en que la semi-anilla *o'* es positiva, la corriente baja por la lámina *b*, sigue la placa *m*, llega á *n* por el alambre conjuntivo *p*, sube por *c*, y se cierra al contacto de la pieza *o*; después, cuando por efecto de la rotación *o* toma el puesto

de *o'*, la corriente no puede cambiar de sentido en el circuito exterior, pues al mismo tiempo que se invierte en los carretes, *o* se ha hecho positivo y *o'* negativo.

El soporte M está provisto de dos piezas metálicas laterales, que comunican con los polos *b* y *c*. Las extremidades del circuito exterior están fijas en dos puntos de esas piezas.

5°. *Interruptor.* — Este órgano accesorio se compone de una tercera lámina elástica *a* (fig. 940) y de dos apéndices *i*, que arrancan de las anillas *o* y *o'* y están aislados en el cilindro de marfil. Cada vez que la lámina *a* toca uno de estos apéndices, es puesta en comunicación con la lámina opuesta *b*, y la corriente queda cerrada en corto circuito, pues entonces pasa de *b* á *a*, y luego penetra en la lámina *c* por la *n*. Al contrario, mientras la lámina *a* no toca uno de los apéndices, la corriente permanece interrumpida, y en el conductor que reune las dos placas *m* y *n* se produce una extra-corriente.

1040. **Máquina de Siemens.** — La modificación más importante introducida desde

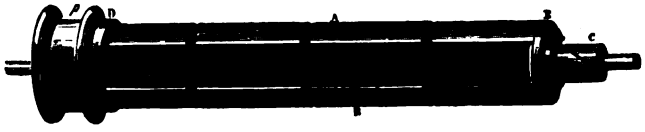


Fig. 944.

la época de Clarke en las máquinas de inducción fué el carrete construido en 1854 por Siemens y Halske. Se distinguía de los ordinarios al mismo tiempo en la forma del núcleo y el modo de estar arrollado el alambre.

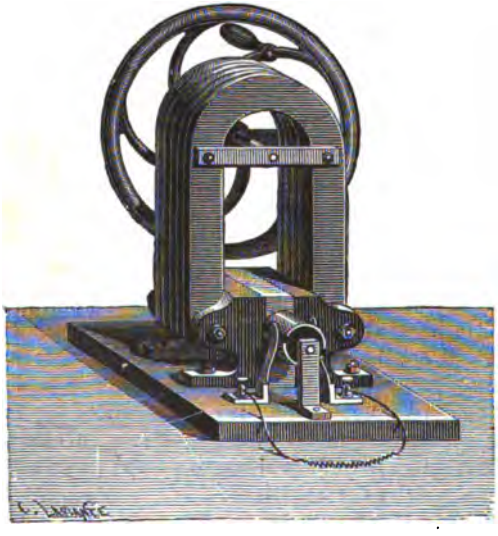


Fig. 945.

El carrete es de forma alargada, en una longitud de 0,50 á 1,50 m, según la potencia que se quiere dar á la máquina. El núcleo es de hierro dulce; primero se le hizo de figura de cilindro, y después rayado en toda su longitud por un corte profundo y ancho (fig. 944). El alambre de cobre, aislado con seda, se arrolla ahí gran número de veces como en un multiplicador, pero *paralelamente* al eje, y no perpendicularmente como en el carrete de Clarke.

Este carrete, provisto de un conmutador, gira entre los brazos de un imán de forma de herradura (fig. 945), cuyas armaduras están arregladas de manera que lo rodean muy estrechamente: esta disposición reduce el campo magnético á su minimum de exten-

sión y á su máximum de intensidad. La máquina conservaba el aspecto general de la de Clarke.

Observación. — En los últimos veinte años se ha construído un número considerable de modelos de máquinas dinamo-eléctricas. Pero como todas se derivan poco más ó menos de dos tipos: 1°. la antigua máquina de Clarke; 2°. la máquina más reciente de Gramme, no hay verdadero interés en conocer más que estos dos tipos.

Fig. 946.

1041. **Máquina de Gramme de corrientes continuas.** — Esta máquina está caracterizada por su inducido especial, llamado *anillo de Gramme* y su colector de corrientes, llamado *colector de Gramme*. Este inducido gira en un campo magnético creado por un imán ó por un electroimán.

1°. *Anillo de Gramme.* — El inducido está formado por cierto número de carretes, reunidos en círculo. No tiene núcleo distinto cada uno de ellos, sino que todos se arrollan sobre un núcleo común que está constituído por un alambre único de hierro dulce, de $\frac{9}{10}$ de milímetro de diámetro, arrollado sobre sí mismo gran número de veces, de modo que forme un haz circular (fig. 946). Las espiras están aisladas unas de otras de modo que se evite la formación de las *corrientes de Foucault*. Los carretes B, C, D..., que se representan separados (fig. 946), están en realidad reunidos uno á otro, según se ve en la parte superior de la misma figura, por escuadras de cobre *mn*. En cada

Fig. 947.

una de las ramas verticales de estas piezas van á soldarse dos alambres de cobre, uno que acaba y otro que empieza dos carretes consecutivos, de modo que el conjunto de los carretes no forma sino un mismo y único circuito inducido.

2°. *Colector de la corriente.* — Las escuadras están aisladas unas de otras y se encuentran fijas en un trozo de boj O (fig. 946), montado en el eje de rotación : los brazos horizontales *mn* de las escuadras forman una envoltura en torno de este eje y dos pinceles (ó *escobas*) de alambres (ó de tela de rejilla metálica) de cobre rojo, fijos en los topes *c* é *i* (fig. 947) frotan constantemente sobre las partes superiores é inferiores de esta envoltura, de modo que recojan las corrientes que se originan en los carretes. El conjunto de las *escobas* y del cilindro de generatrices metálicas es lo que constituye el *colector de Gramme*.

3°. *Teoría.* — *Generación de la corriente.* — Si se produce el espectro magnético del inductor de la máquina (fig. 948), se observa en él una disposición especial de las líneas de fuerza. La mayor parte de estas líneas emanadas de la armadura N, después de haber atravesado el intervalo de las armaduras (ó *entrehierro*), penetran en el anillo que siguen circularmente por mitad para ir á reunirse á su salida con la armadura S. De manera que el campo magnético está dirigido de una manera general de N á S.

Fig. 948.

Supongamos que una espira se mueva con velocidad *v* á lo largo del anillo, y en el sentido del movimiento de las agujas de un reloj ; sea H la intensidad del campo cortado normalmente por la parte útil *l* de la espira (parte arrollada frente á las armaduras).

La fuerza electromotora de inducción tiene como valor H*lv*. Tiende á producir una corriente dirigida de atrás hacia delante en la sección *a* de la espira. En a_1 el valor de H es máximum. En a_3 es nulo, puesto que el elemento de espira es tangente al campo ; por consecuencia pasa lo mismo con *e*. Más allá de a_3, si el campo H conserva la misma dirección, como el movimiento muda de sentido, ocurre lo mismo con la fuerza electromotora.

En resumen si se considera el conjunto de los carretes (seriados de la manera dicha), y el inducido en rotación, se ve que las fuerzas electromotoras inducidas en los carretes colocados á la derecha de la vertical AB se suman por una parte, y las engendradas en la parte izquierda se suman análogamente entre sí y se oponen á las primeras en el inducido. La línea AB se llama *línea neutra*.

Pero si se colocan las dos escobas sobre los contactos encontrados por la línea neutra AB, los cuales corresponden respectivamente á los puntos en que la fuerza electromotora *e* cambia de signo, las dos escobas adquirirán en circuito abierto una diferencia de potencial tanto mayor cuanto más considerables sean los factores *l*, *v* y H.

Colección de la corriente. — Las cosas ocurren como si se parearan *en oposición*, es decir, por sus polos del mismo nombre, dos series del mismo número de ele-

mentos voltaicos. Para producir una corriente valiéndose de esta agrupación, hay que unir evidentemente los puntos C y Z por un circuito exterior (fig. 949). Desde ese instante la corriente circula de manera continua desde C hacia Z, y ya las dos pilas en serie no están en oposición, sino que se encuentran *asociadas en cantidad.*

Las corrientes del anillo de Gramme se recogen de manera análoga. Colocando las escobas F y F' sobre el diámetro perpendicular á la línea de los polos, es decir, en los puntos donde las dos fuerzas electromotoras van á reunirse, estas escobas se encontrarán en las mismas condiciones que si comunicaran con los polos C y Z de la pila precedente : un circuito exterior que va de una escoba á otra será recorrido por una corriente, *continua* si el contacto es permanente, y *constante* si la velocidad de rotación es uniforme.

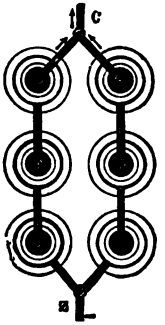


Fig. 949.

Observaciones. — 1°. *Variación de la corriente.* — Esta corriente sufre necesariamente pequeñas variaciones de intensidad. En efecto, cada vez que una escoba está en relación con dos contactos sucesivos del colector, queda eliminado de la serie un carrete, puesto que se encuentra cerrado sobre sí mismo. Se observará por lo demás que los carretes suprimidos se encuentran en las regiones donde el campo es más débil. Es claro por otra parte que este efecto será tanto más atenuado cuanto mayor número de carretes tenga el inducido.

2°. *Disposición de las escobas.* — Las escobas colectoras no se encuentran colocadas en las máquinas exactamente en la línea AB, según debería exigirlo la teoría precedente; esto no ocurre sino cuando la máquina funciona en *circuito abierto,* es decir, cuando sus topes no están reunidos por un circuito exterior; pero en *circuito cerrado* las escobas se mueven, según A' B', cierto ángulo en el sentido del movimiento generador.

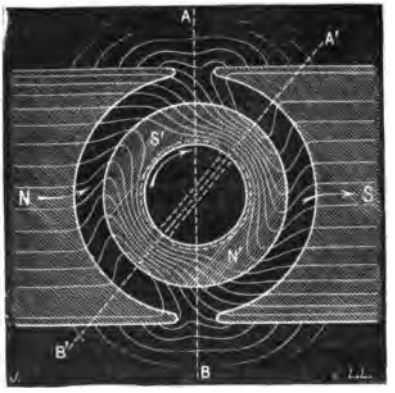


Fig. 950.

Es por que, en realidad, el campo total resulta del campo inductor y del que produce el núcleo del inducido, cuando se encuentra imantado por las corrientes opuestas que circulan en las dos mitades de los carretes que sostiene. La composición de los dos campos tiene por efecto torcer las líneas de fuerza primitivas en el sentido del movimiento (fig. 950) é impulsar los puntos en que la fuerza electromotora inducida es nula cierto ángulo en el expresado sentido. De ahí resulta una desviación AA' de la línea neutra en el sentido de la rotación del anillo. En la práctica se mueven los sistemas de las dos escobas de manera que las chispas dejen de saltar entre ellas y el colector. La *línea neutra* A'B' forma con su posición teórica AB un ángulo más ó menos grande, *que puede llegar* á 10° para grandes velocidades. Pero la posición de las escobas depende de la orientación de la línea neutra; deben girar sobre la horizontal (ó sobre la vertical, según la orientación de los polos inductores) el mismo ángulo que la línea neutra. Este ángulo depende por lo demás de la intensidad *i* de la corriente, lo que exige un arreglo cuando se cambia el régimen de la máquina. Se le efectúa actuando sobre el mango P (fig. 952) que gobierna las escobas.

1042. **Máquina de Gramme de corrientes continuas.** — 1°. *Tipo de taller.* — Entre las máquinas *dinamo-eléctricas* de corriente continua, el modelo llamado *tipo de taller*

es el más antiguo en la industria. El carrete inducido y el colector de corrientes son los mismos, y las corrientes son engendradas y recogidas ahí de la misma

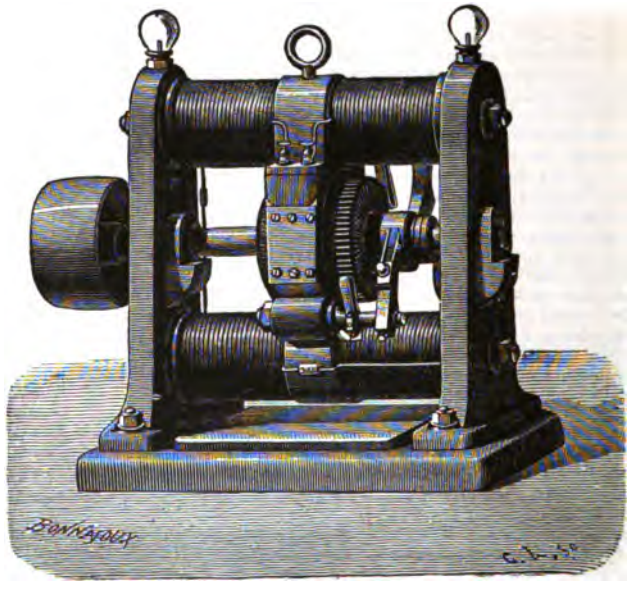


Fig. 951.

manera que precedentemente. El *inductor* está constituído por dos electroimanes de dos brazos horizontales (fig. 951), dispuestos uno frente á otro en un plano vertical.

2°. *Tipo superior.* — Un nuevo modelo, llamado *tipo-superior* [1] (fig. 952), tiende á reemplazar actualmente el tipo de taller. El inductor fijo es un electroimán de forma de herradura E, cuyos núcleos y superficies polares A y B son de fundición dulce, y vaciados en un mismo trozo con la armadura. El anillo gira entre las piezas polares y está sostenido por un eje, provisto de la polea R, gobernada por una correa de transmisión. Este eje gira en plataformas de engrasado automático. La colocación de las escobas P y P' puede efectuarse fácilmente por medio de un doble porta-escobas que se puede mover en una sola pieza.

3°. *Usos.* — Estas máquinas de corriente continua se emplean en las artes más diversas : galvanoplastia, alumbrado eléctrico, transmisión de la energía á distancia ; sólo que las dimensiones de los carretes, del inductor y del inducido son diferentes, según el trabajo que se ha de ejecutar. Cuando se necesita producir electricidad en gran cantidad, como en las aplicaciones electroquímicas, la máquina debe tener resistencia interior escasa, y entonces los electroimanes están provistos, no de alambre redondo, sino de una sola banda de cobre delgado, que coge todo el ancho de las barras y forma una espira única alrededor de cada una de ellas ; el anillo está cubierto á su vez con alambre semiplano muy grueso. Cuando hay que producir electricidad *de alto potencial*, como en el alumbrado eléctrico, se hacen los carretes con alambre ordinario, de diámetro más pequeño.

1043. **Excitación de las máquinas de corriente continua.** — El campo iuductor de las

1. Este calificativo no se justifica más que por ciertos perfeccionamientos de orden mecánico y material, que disminuyen el coste del aparato y hacen más cómodo su manejo.

máquinas puede ser creado por imanes ó por electroimanes; éstos son animados por la corriente de una máquina independiente llamada *excitadora*. Ordinariamente la *corriente de excitación* de los electros se toma de la misma máquina, que entonces se llama *auto-excitadora*. Este último modo de excitación, que el magnetismo remanente de los electros hace posible, admite varias soluciones.

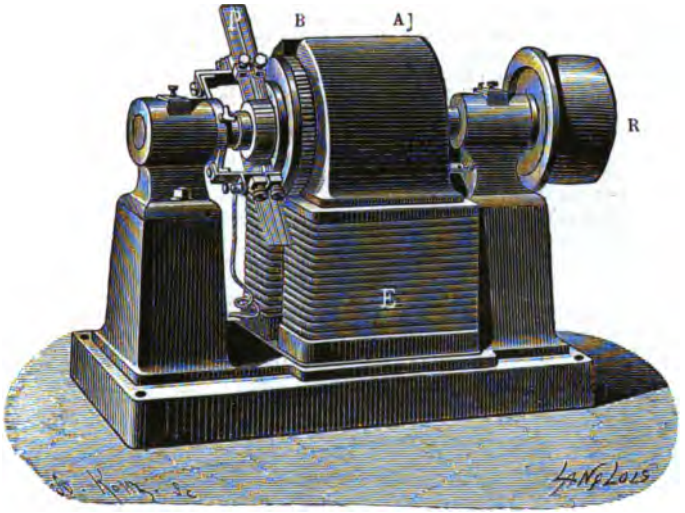


Fig. 952.

1°. *Excitación en serie.* — Este es el caso en que *el alambre arrollado sobre los electros es la continuación del que constituye el inducido :* la totalidad de la corriente atraviesa al mismo tiempo el alambre del inducido, el del inductor y el circuito exterior. Hay evidentemente interés en tomar entonces como circuito inductor un conductor poco resistente. Este modo de excitación, que presenta la ventaja de ser el más sencillo, tiene varios inconvenientes.

Si la resistencia exterior es demasiado grande, *la máquina no se carga.*

Si, dada velocidad constante, la resistencia exterior disminuyera cada vez más, la intensidad de la corriente aumentaría en la misma cantidad y el alambre del inducido podría ser quemado por el efecto Joule. Evítase este accidente intercalando en el circuito *alambres fusibles*, que se funden é interrumpen el circuito antes de que la corriente sea peligrosa para la máquina.

Por la misma razón hay que evitar las *corrientes-circuitos*, que provocarían brusco aumento de intensidad y vivo desprendimiento de calor.

Cuando se quiere parar una máquina excitada en serie, importa introducir progresivamente resistencias en el circuito ó, si se prefiere hacerlo así, derivar sobre el alambre inductor resistencias decrecientes, de modo que se debilite poco á poco la corriente de excitación : la parada brusca provocaría efectos de inducción peligrosos para el inducido.

2°. *Excitación en derivación.* — Se excita la máquina *en derivación* disponiendo el alambre de los electros *en derivación* sobre el alambre del inducido. Para debilitar la corriente lo menos posible, en el circuito exterior, hay que dar al circuito de excitación gran resistencia. Habría pues que aumentar el número de las espiras de modo que se obtuviera un número de ampères-vueltas NI suficiente.

En el caso de excitación en serie, la máquina no puede cargarse sino en tanto que se unen sus topes por medio de un conductor, pues sin esto, el alambre del inducido y el del inductor formarían un circuito abierto; aquí ya no es lo mis-

mo, pues el conjunto de los dos alambres en derivación forma siempre un circuito cerrado.

Además, no hay que temer, como en el caso precedente, que el efecto de una fuerza contra electromotora contenida en el circuito exterior vaya á invertir bruscamente la imantación de los electros, por efecto de una debilitación de la corriente de la máquina.

Sin embargo, si la resistencia exterior disminuye más allá de cierto límite, la máquina puede descargarse, pues la corriente que circula en el inductor no es ya bastante intensa para mantener el estado magnético de la máquina. Si la resistencia del circuito exterior aumenta, la corriente crece; lo mismo pasa con la fuerza electromotora inducida. Es lo inverso de lo que ocurre en el caso de la excitación en serie.

Agreguemos que el alambre de los inducidos de las máquinas excitadas en derivación tiene ordinariamente resistencia muy escasa, tanto que la fuerza electromotora inducida no se distingue sensiblemente de la diferencia de potenciales en los topes de la máquina.

3°. *Dinamos compound.* — En los *dinamos compound* se emplean los dos modos de arrollar precedentes, de modo que se obtenga una diferencia de potenciales en las escobas, constante é independiente del circuito exterior. Hasta se puede llegar á mantener la diferencia de potenciales constante en los topes del aparato de utilización.

1044. **Nuevo tipo de máquina Gramme de corriente continua : Modelo Limb y Gianotti.** — Hay (fig. 953) una dinamo de doble arrollamiento F, *f*, construida por MM. Limb y Gianotti, que presenta varios perfeccionamientos.

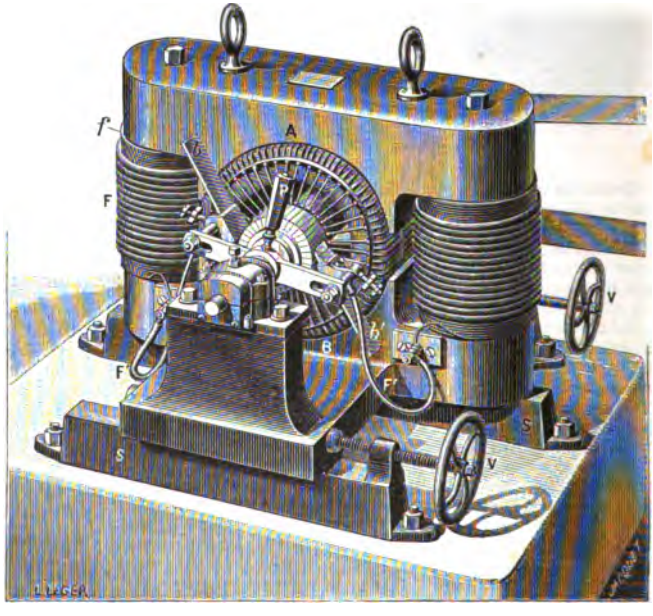


Fig. 953.

La línea neutra teórica es horizontal, las piezas polares están en A y B, las escobas en *b* y *b'*. Los tornillos de volante V sirven para mover la máquina sobre los sostenes S, de modo que la correa de transmisión quede bastante tensa. El núcleo del inducido está formado por coronas apiladas y aisladas unas de

otras; los carretes se alojan en cortaduras practicadas regularmente en el contorno del núcleo. El entrehierro puede ser entonces muy pequeño. Por fin el modo de amarre del inducido en el árbol asegura una buena ventilación.

1045. **Máquina de Gramme de corrientes alternas ó Máquina para luz.** — Esta es una máquina *dinamo-eléctrica de corrientes alternas*, impropiamente llamada *auto-*

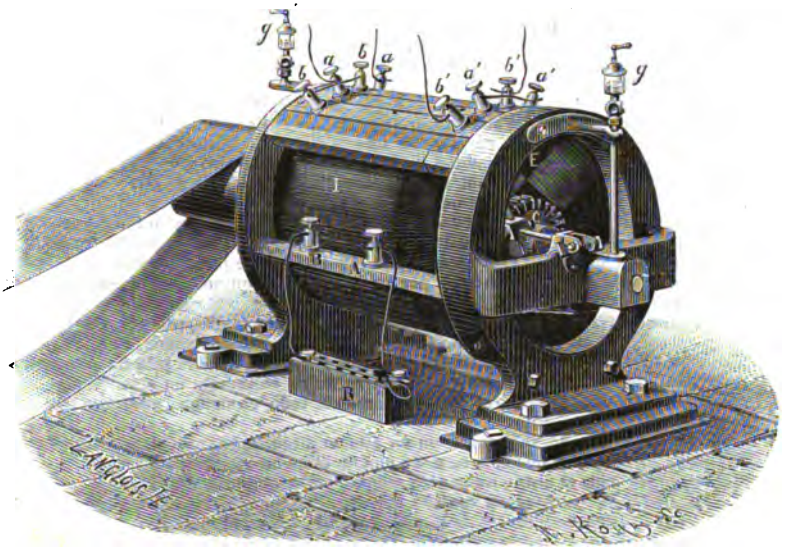


Fig. 954.

excitadora. Á la izquierda (fig. 954) se encuentra la máquina de luz propiamente dicha; la excitadora está á la derecha. Esta es una máquina ordinaria de Gramme de corrientes continuas. N y S (fig. 955) son los dos polos del inductor fijo II' es el anillo inducido móvil, cuyo colector se proyecta según un pequeño círculo concéntrico é interior al anillo.

La máquina de luz propiamente dicha está formada por un inducido fijo y un inductor móvil.

En el modelo ordinario, el inductor está formado por seis barras de electroimanes, implantadas normalmente en un bloque hexagonal concéntrico al eje de rotación. El circuito inductor se arrolla en torno de estas barras de manera que forme, cuando lo recorre la corriente continua de la excitadora, polos alternativamente contrarios cuyas superficies polares se extienden perpendicularmente á la dirección de las barras.

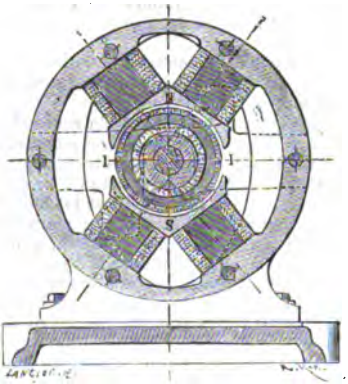


Fig. 955.

El inducido es un carrete de alambre de cobre, arrollado sobre un cilindro de hierro dulce. Este núcleo no es una masa continua, sino que está formado por la superposición de varias capas de alambre de hierro. El carrete está á su vez dividido en doce segmentos, bien

aislados unos de otros, pero en comunicación tres á tres, de modo que constituyan *cuatro circuitos distintos :* por ejemplo, los carretes 1, 3, 5 forman un primer circuito, y los 2, 4, 6 otro ; análogamente, los carretes 7, 9, 11 forman un tercer circuito, y 8, 10, 12 un cuarto. Ordinariamente se agrupan los dos primeros circuitos *en serie*, por sus polos de nombre contrario, lo mismo que los dos últimos, á fin de que la máquina de luz esté dividida en dos que pueden hacerse funcionar juntas ó separadamente.

Generación de las corrientes — Las corrientes son inducidas en el carrete fijo por el movimiento del electroimán inductor. Este es animado por la corriente continua de la excitadora.

Observación. — Los dos topes A y B que se ven (fig. 954) delante de la armadura, están colocados en el circuito de la excitadora. Esos topes forman ahí una interrupción que se puede cerrar con una resistencia variable, de modo que aumente ó disminuya la intensidad de la corriente continua, y por consiguiente la del magnetismo inductor. Así se modera y arregla, dentro de ciertos límites, según es necesario, la potencia de la máquina de luz.

1046. **Reversibilidad de las máquinas dinamo-eléctricas.** — Las máquinas dinamo-eléctricas prueban que haciendo dar vueltas á carretes delante de un electroimán se engendran corrientes. Con arreglo á la ley de Lenz se puede prever que si se hace pasar una corriente continua por una de esas máquinas, se comunicará al órgano móvil un movimiento inverso del que produciría esta corriente continua.

La experiencia confirma esta previsión. Realízasela fácilmente por medio de una cualquiera de las máquinas de Gramme de corrientes continuas. Si se ponen los topes *c* é *i* (fig. 947) en comunicación con los polos de una pila de algunos elementos Bunsen, como el núcleo de hierro dulce se imanta en seguida por la acción de la corriente que recorre los carretes, todo el sistema adquiere movimiento de rotación rápida.

Ó bien de otro modo, se colocan en un mismo circuito dos máquinas parecidas á la de la figura 951, y después se pone una de ellas en movimiento : la corriente que engendra pasa al anillo de la otra máquina, que empieza á girar. Si entonces se hace andar la primera en sentido inverso, la segunda se para y después se pone á dar vueltas de nuevo y *en el mismo sentido :* como la misma corriente pasa sucesivamente por el carrete fijo y el móvil, que reaccionan uno sobre otro, se concibe que el producto de las dos acciones del mismo signo permanece siempre idéntico sea cual fuere el sentido de la corriente.

Exprésase este hecho diciendo que las máquinas Gramme son *reversibles*. Lo mismo ocurre en general con todas las máquinas dinamo-eléctricas.

1047. **Motores eléctricos. — Transporte de la energía mecánica.** — Llámase *motores eléctricos* á las máquinas que transforman la *energía eléctrica* en *energía mecánica*, así como los *motores térmicos* transforman el calor en esta última clase de energía.

Los primeros motores eléctricos construídos fueron los llamados *electromagnéticos*, en que se utilizaba la fuerza atractiva de los electroimanes como fuerza motora.

Según la propiedad de la reversibilidad, una máquina dinamo-eléctrica cualquiera puede servir de motor, siendo tomada de una máquina idéntica la corriente excitadora : la que engendra la corriente se llama la *generadora*, y la que la utiliza *receptora*. Generalmente se emplean dinamos de corrientes continuas.

La principal aplicación de los motores es el transporte de la energía mecánica. Esta energía, suministrada por un motor cualquiera á la generadora, se transforma ahí en energía eléctrica, que es enviada á una distancia cualquiera en forma de corriente eléctrica á la *receptora*, que de nuevo la transforma en energía mecánica, bajo el aspecto de movimiento de rotación.

La energía transmitida á la receptora puede gastarse de diferentes maneras en luz (alumbrado eléctrico), en calor (calefacción eléctrica), ó en trabajo mecánico (locomoción eléctrica y movimiento de las máquinas-herramientas).

Compréndese el interés del problema del transporte de la energía cuando se considera el número y la importancia de los focos naturales de energía mecánica : cascadas, vientos, mareas, etc., no utilizados todavía.

1048. **Estudio de rendimiento de los motores eléctricos.** — 1°. *Fórmulas.* — Supongamos que se haga dar vueltas á la *generadora* por medio de un motor de vapor ó de otra clase, y sea r_1 su resistencia interior y E_1 la fuerza electromotora

constante desarrollada. La corriente circula en un *hilo de línea* de resistencia total ρ. Penetra en una *receptora* de la misma especie que la primera máquina, de resistencia interior r_2 : el inducido de esta máquina se pone entonces á dar vueltas y desarrolla, en las condiciones donde funciona, una fuerza electromotora E_2 de sentido opuesto á E_1, tanto que la intensidad de la corriente que pasa por el circuito total de resistencia $r_1 + r_2 + \rho$ tiene como intensidad

$$[1] \qquad I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2 + \rho}.$$

La *potencia eléctrica* de la generatriz es entonces $P_1 = E_1 I$ [2]
y la de la receptora $P_2 = E_2 I$. [3]

El *rendimiento eléctrico* de la transmisión tiene pues como expresión

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{E_2}{E_1}.$$

Observación. — Este rendimiento es siempre inferior á la unidad. En efecto, si se pudiera tener $E_2 = E_1$, seguiríase de aquí, según las ecuaciones [1], [2], [3], que I, P_1, y P_2 serían nulos y ya no habría transmisión de potencia. Por consiguiente, si se trata de hacer tender hacia la unidad el rendimiento eléctrico, se disminuye al mismo tiempo la potencia transmitida.

2°. *Máximum de la potencia transmitida.* — Tratemos de averiguar en qué condiciones es máximum la potencia transmitida.

Tiénese

$$[4] \qquad P_2 = E_2 I = \frac{E_2 (E_1 - E_2)}{r_1 + r_2 + \rho}.$$

P_2 será máximum al mismo tiempo que el producto

$$E_2 (E_1 - E_2),$$

si se supone que no se modifica la resistencia del circuito. Pero la suma de los dos factores E_2 y $E_1 - E_2$ tiene como valor E_1, es decir que esta suma es constante: el máximum se efectúa por consiguiente cuando los dos factores son iguales.

Tiénese entonces

$$E_2 = E_1 - E_2, \quad \text{de donde} \quad E = \frac{E_1}{2}.$$

Por consiguiente, si una generatriz funciona de modo que desarrolle una fuerza electromotora E_1, se transmitirá por segundo á la receptora la cantidad de energía máxima arreglando la instalación de modo que la fuerza contraelectromotora desarrollada E_2 sea igual á $\frac{E_1}{2}$. La intensidad de la corriente es entonces igual á la mitad de la que se obtendría nivelando la receptora.

En estas condiciones el rendimiento eléctrico es igual á $\frac{1}{2}$.

Hay pues que considerar un rendimiento que corresponde á la mayor economía de energía y otro que corresponde en cierto modo á la mayor economía de tiempo.

3°. *Rendimiento industrial.* — En el punto de vista práctico, el *rendimiento industrial* de la transmisión es el cociente de la potencia mecánica gastada en el árbol de la generatriz, y de la potencia mecánica recogida en el árbol de la receptora.

Como es imposible evitar el efecto Joule, que es proporcional al cuadrado de la intensidad, hay una energía perdida en calor radiado por el circuito. Atenúasele mucho transmitiendo la energía eléctrica bajo un potencial elevado y escasa intensidad.

1049. **Transporte de la energía por las máquinas de corrientes alternas.** — En el caso de que se empleen máquinas de corrientes alternas, puede usarse un cable de

pequeña sección. La corriente de la generatriz tiene entonces una intensidad eficaz I muy escasa. Como la potencia transmitida $P_2 = E_2 I$ permanece constante, la fuerza electromotora eficaz de la generatriz será muy grande.

Para utilizar esta corriente se podrá, si hay caso, modificar las cualidades de energía transmitida, por medio de un transformador apropiado. Se aumentará la intensidad disminuyendo la fuerza electromotora : el producto E' I', es decir, la potencia utilizada, permanecerá muy sensiblemente constante, pues el rendimiento eléctrico de un transformador bien hecho puede llegar á 96 por 100.

CAPÍTULO XIV

APLICACIONES DE LA ELECTROLISIS.

GALVANOPLASTIA Y ELECTROQUÍMICA. — ACUMULADORES.

1050. *Definición.* — La descomposición de las sales por la pila ha recibido importante aplicación en la *galvanoplastia.* Se da este nombre al arte de modelar los metales, precipitándolos de sus disoluciones salinas por la acción lenta de una corriente eléctrica.

Comprende dos órdenes de aplicaciones: 1°. el depósito de capas metálicas, más ó menos gruesas, que se moldean exactamente sobre los objetos que se trata de reproducir, pero *sin adherirse á ellos ;* 2°. el depósito de capas metálicas delgadas que *se adhieren* á los objetos y protegen su superficie sin alterar la forma. Los métodos que sirven en el primer caso constituyen la *galvanoplastia propiamente dicha ;* los usados en las otras aplicaciones constituyen la *electroquímica* ó *galvanización*, que comprende : el *dorado*, el *plateado*, el *baño de cobre* y el *niquelado galvánicos.*

1051. **Galvanoplastia propiamente dicha.** — En 1837, Jacobi en Rusia y Spencer en Inglaterra hallaron medio de obtener moldes de medallas, y después reproducciones en cobre de estas medallas por la intervención de la corriente de la pila. Jacobi tuvo algunos años después la idea de emplear un *anodo soluble*, es decir, una lámina de cobre que sirve de eléctrodo positivo en el baño de cobre (fig. 956); como esta lámina es disuelta por el oxígeno que allí se desprende, y que da origen á la producción de sulfato de cobre, tiene la doble ventaja de evitar la polarización y de mantener constante la concentración del baño metálico. Por fin, Bocquillon en Francia y Murray en Inglaterra fueron los primeros en servirse de moldes no metálicos.

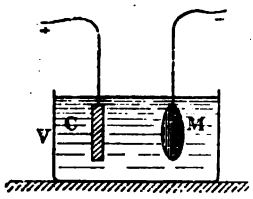


Fig. 956.

Las operaciones de galvanoplastia pueden resumirse en dos principales[1].

I. Formación de un molde, sea de metal, sea de materia plástica metalizada ó hecha conductora por medio de la electricidad.

II. Depósito sobre este molde de una capa gruesa y no adherente de cobre.

I. *Preparación del molde.* — 1°. *Moldeado mecánico.* — Puede usarse la aleación Darcet, que se moldea sobre el objeto que se desea vaciar.

También se puede, cuando el objeto es metálico, depositar sobre él una ligera capa de cobre. Colócasele como catodo en el baño de galvanoplastia, después de haberlo frotado ligeramente con una muñeca de algodón en rama empapada en aguarrás para impedir la adherencia de los dos metales.

Estos procedimientos no se aplican sino á objetos « *de fácil descascaronado* », es decir, que no presentan grandes huecos, y que no son atacables por el calor en el primer método, ni por la acidez del baño en el segundo.

2°. *Moldeado no metálico.* — Tómanse sin dificultad los moldes de medallas y otros objetos de *fácil descascaronado*, vaciando en su superficie *cera fundida* ó *estearina*, ó *gelatina* ó *yeso* ; pero el sistema más usado es moldear con *gutapercha*.

Ablándase la guta en el agua hirviendo, y se la comprime sobre el objeto, sea con la mano, que se tiene cuidado de mojar en agua fría, sea por medio de una prensa hidráulica hasta enfriamiento completo de la masa. La guta conserva bastante elasticidad para poder ser retirada del modelo aunque éste presente huecos pronunciados. Para impedir su adherencia, basta untar el modelo con agua de jabón antes de aplicar la guta[2].

Luego se *metalizan* estos moldes untándolos con plombagina, ó mejor aún, con una mezcla de plombagina y cobre ó plata en polvo, obtenidos por precipitación.

II. *Depósito del cobre en los baños y aparatos de galvanoplastia.* — El baño *simple* ó *aparato simple* (fig. 957) se compone de un elemento de Becquerel donde el objeto que se trata de cubrir reemplaza al polo de cobre. Este baño se utiliza muy poco desde la introducción de las máquinas dinamoeléctricas en los talleres de galvanoplastia.

Generalmente se usa el *aparato compuesto* (fig. 958), que está constituído por una cuba de dimensiones variables llena con el baño de cobre, y provista de dos varitas de latón : una de ellas, B, que comunica con el polo negativo del electromotor, sostiene los moldes que se trata de preparar, y la otra D, que se enlaza con el polo positivo,

1. Los datos técnicos nos han sido proporcionados con mucha amabilidad por M. M. Bazinet, alumno que fué del Laboratorio de ensayos (Física) y director de una fábrica de electroquímica.

2. En el caso de un objeto *de relieve* se saca el molde en varios pedazos, que después se reunen por medio de abrazaderas.

sostiene el anodo soluble que es de cobre rojo. El *baño compuesto* es una solución casi saturada de sulfato de cobre, acidulada con ácido sulfúrico (8 p. 100 en peso próximamente).

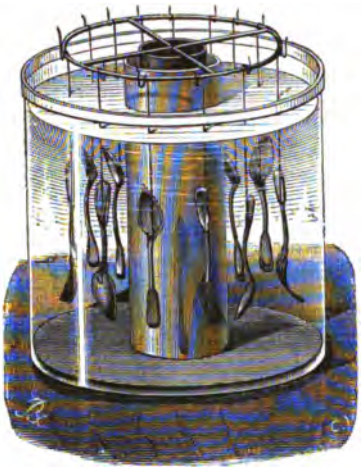


Fig. 957.

La intensidad de la corriente debe ser pequeña al principio : 100 ampères todo lo más por metro cuadrado. Cuando todas las partes del molde están bien cubiertas, se pueden alcanzar de 300 á 500 ampères, y activar así la operación. Al cabo de veinticuatro horas se tendrá una capa de 1 milímetro de grueso próximamente.

Cuando el depósito llega á tener el grueso deseado, se lava el objeto y se le retira de su molde ablandando la guta con agua caliente.

1052. **Electrotipia.** — Cubriendo de cobre el molde de un grabado en madera, en cobre, ú obtenido por la fotografía, resulta un clisé galvánico de este grabado. Ese clisé es sumamente fino (próximamente 0,05 mm. de grueso), y no podría resistir á la

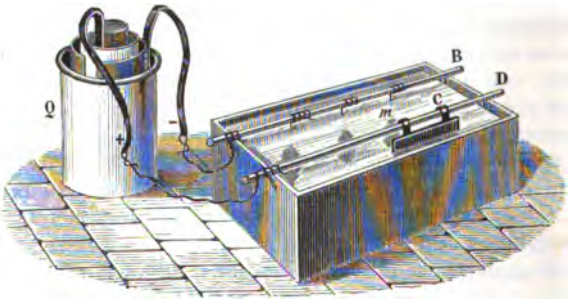


Fig. 958.

presión de las prensas tipográficas si no se le reforzara vaciando por detrás una capa de la aleación de letra de imprenta, que permite obtener numerosas reproducciones del grabado.

Para darle más dureza se le cubre con un depósito pelicular de hierro en un baño que se ha formado disolviendo bajo la influencia de la corriente eléctrica una lámina de hierro en una solución

de carbonato de amoniaco. También se usa el platino y el nickel.

Preparados de este modo, los clisés galvánicos pueden soportar enormes tiradas sin deformación. Por lo demás, el clisé primitivo (madera ó cobre) permanece intacto y puede suministrar tantos clisés galvánicos como se quiera [1].

1053. **Electroquímica. — Operaciones preliminares.** — El dorado, el plateado, etc., *galvánicos*, que constituyen la *electroquímica* propiamente dicha, exigen ciertas operaciones preliminares, que se efectúan de distinto modo, según que los objetos son de cobre ó de latón, ó bien de algún otro metal. Tienen por objeto librar á los objetos que se van á tratar de las materias grasas y de los óxidos de que siempre está untadas y hacer su superficie más á propósito para recibir la capa del metal precioso.

Esta preparación es sumamente importante, pues todo el éxito depende de la manera cómo se la efectúa.

1°. *Limpieza de los objetos de cobre ó de latón.* — Se les priva de las materias orgánicas, sea por el *recocido*, que consiste en calentar los objetos hasta destrucción de aquéllas, sea más sencillamente mediante inmersión prolongada en una solución hirviendo y concentrada de *potasa de América.*

Después se colocan los objetos durante algunos instantes en un baño de 20 partes de ácido sulfúrico por 100 de agua, que disuelve el bióxido de cobre que puede existir en la superficie de las piezas.

Al terminar esta operación, las piezas presentan un color rojo uniforme, debido á una capa de protóxido de cobre. Hácesela desaparecer remojando algunos instantes los objetos en el ácido nítrico ordinario (*paso al agua fuerte*), y después en una mezcla de ácido nítrico, de ácido sulfúrico, de sal marina y de hollín calcinado (*baño de blanqueo*).

Si la limpieza ha sido efectuada cuidadosamente, la pieza sale del baño de blanqueo con una superficie bien brillante y sin manchas. En todas estas operaciones, los objetos son mantenidos por garfios de cobre para evitar las manchas que produciría el contacto de los dedos.

Observación. — Si se quiere obtener un dorado ó plateado *mate*, hay que dar el tono opaco á las piezas después de pasarlas por el agua fuerte, cosa que se obtiene sumergiéndolas en una mezcla de ácido sulfúrico, de ácido nítrico y de sulfato de zinc, calentado á 90° próximamente. Después se las pasa por el baño de blanqueo.

2°. *Caso de los demás metales.* — Los metales que no son el cobre y sus aleaciones no podrían soportar estas diferentes operaciones sin alterarse profundamente.

Límpiase la plata desengrasándola en la potasa, dejándola algunos instantes en el segundo baño, y frotándola al fin con un cepillo de crin y una lejía de piedra pómez finamente pulverizada.

El *hierro* y el *acero* se pasan á la potasa, y después se sumergen algunos instantes en ácido clorhídrico.

El *zinc* es desengrasado rápidamente en la potasa (que lo disolvería si la estancia se prolongara), y después se le pasa por el baño de blanqueo.

1. *Caso de los objetos de relieve : procedimiento Lenoir.* — Para reproducir los objetos de *relieve*, se usa el método siguiente debido á M. Lenoir : Prepáranse moldes de las diferentes partes del objeto y se les metaliza, reuniéndolas luego, después de haber introducido en su interior un haz de alambres de platino á que se da *grosso modo* la forma del objeto que se trata de reproducir; viértese por fin la solución de sulfato de cobre en el molde y se hace pasar la corriente.

El *plomo*, el *estaño* y sus aleaciones (metal blanco) se pasan rápidamente á la potasa y luego se frotan con piedra pómez.

Observación. — Todas estas operaciones de limpieza exigen vigilancia constante, pues una estancia demasiado prolongada en los ácidos atacaría desigualmente la superficie de las piezas y produciría *picaduras* [1].

3°. *Amalgamación de los objetos.* — Una vez bien limpios los objetos se les lava en agua abundante, en una serie de tres ó cuatro balsas dispuestas en cascada, y luego se les pasa rápidamente por una solución muy débil de nitrato de mercurio. De esta manera se deposita en su superficie una capa de mercurio imperceptible á la vista, pero que aumenta mucho la adherencia del oro ó de la plata que se ha de depositar encima.

4°. *Baño de cobre pelicular.* — Los objetos de estaño, de zinc y de hierro se doran ó se platean mal directamente. Hay que cubrirlos previamente con una capa muy delgada de cobre. Se les suspende como catodo en un baño de cianuro doble de cobre y de potasa calentado á 80° próximamente; el anodo soluble es una lámina de cobre.

1054. **Dorado galvánico.** — Se ha variado mucho la composición de los baños de oro. Unos se emplean en frío, los otros en caliente. Es preferible operar á 80° próximamente.

He aquí las fórmulas más usadas:

Cianuro de potasio puro.	50 gramos.
Oro reducido á cloruro neutro.	10 —
Agua destilada ó agua manantial.	10 litros.

Este baño se coloca en una cuba de fundición esmaltada que se calienta en el baño de maría ó por medio del vapor. Permite obtener capas de oro tan espesas como se quiere.

Un baño de 1 gramo por litro deposita próximamente 25 centigramos por hora por cada decímetro cúbico [2].

La fuerza electromotora y la intensidad de la corriente deben ser muy escasas. Se necesita próximamente una caída de potencial de medio volt entre el anodo y el catodo, y una densidad de corriente de 1 ampère por 10 decímetros cúbicos de catodo.

El *anodo* es una lámina de oro fino, que se sumerge más ó menos en el baño para hacer variar la resistencia del circuito, y por consiguiente la intensidad de la corriente. El *catodo* se forma por el objeto que se trata de dorar suspendido por un garfio de cobre de una barra de cobre fija.

Desde que el grueso de la capa es algo fuerte — 4 ó 5 decigramos por 1 decímetro cúbico — el depósito se vuelve mate y térreo: vuélvese al tono brillante frotándolo con un cepillo de alambres de latón muy delgados (*rascador*).

Observaciones. — 1°. *Oro amarillo.* — El baño normal da un dorado de hermoso color amarillo. Si la corriente es demasiado intensa, el depósito toma tonos rojizos.

2°. *Oro rojo.* — Para obtener el oro rojo, basta añadir al baño cianuro de cobre:

1. Los baños ácidos que emiten vapores nocivos para la salud, se colocan en cubas de asperón, debajo de una campana que tire bien. Estas cubas descansan en una especie de artesa de mampostería cubierta de cemento, donde circula constantemente agua, de manera que sea posible lavar de prisa los objetos al salir de cada baño.

2. En el dorado de la joyería menuda no se depositan sino capas muy delgadas de oro y se doran grandes cantidades de cobre. Así es que el baño precedente se alteraría con rapidez por los rastros de cobre que disuelve el cianuro durante los primeros instantes de la operación.

Entonces se prefiere reemplazar por el baño siguiente:

Oro en cloruro. . . .	10 gramos.	Sulfito de sosa	100 gramos.
Cianuro	50 —	Agua.	20 litros.
Fosfato de sosa. . . .	600 —		

Estas dos últimas sales se añaden para favorecer la disolución del oro y aumentar la conductibilidad del baño; el anodo es una lámina de platino. Renuévase este baño desde que empieza a dorar rojo. Después sirve de baño de oro rojo hasta su completo agotamiento.

El cobre y sus aleaciones, la plata y el acero pulimentado se doran muy bien en estos baños. Los demás metales comunes necesitan ser previamente cubiertos de cobre.

entonces se deposita una aleación de oro y de cobre que, según la proporción del cobre, toma todos los tonos, desde el rosado pálido hasta el rojo vivo.

3°. *Oro verde.* — El oro verde se obtiene añadiendo al baño de oro cianuro de plata.

4°. Las cantidades de cianuro de cobre ó de plata que deben añadirse no pueden fijarse con precisión de antemano; el operador debe hacerlas variar, así como la intensidad de la corriente, según el tono que desea obtener.

1055. **Plateado.** — El baño de plateado es sencillamente una solución de cianuro doble de plata y de potasio que contiene 10 ó 20 gramos de plata por litro. Funciona en frío.

El anodo soluble es una lámina de plata pura.

En los establecimientos importantes, el baño de plateado se coloca en una gran cuba de madera, ó mejor de palastro forrado con gutapercha.

La corriente debe tener dos ó tres volts de fuerza electromotora y una densidad de 50 ampères por metro cuadrado de catodo.

Así se depositan regularmente capas de plata tan gruesas como se quiera. Para los cubiertos se necesitan por lo menos tres gramos por pieza para que el plateado sea duradero.

Observación. — 1°. *Bruñido.* — Al salir del baño, las piezas tienen un aspecto térreo que se hace desaparecer con el rascador: después se les *bruñe.*

Esta operación consiste en frotarlas enérgicamente con una piedra de ágata bien redondeada, dispuesta en un mango de madera, y mojada constantemente con agua de jabón. Esta fricción rebaja los poros del metal y le da el brillo de un espejo.

Sécanse bien los objetos en serrín, de *madera blanca.* — El de *pinsapo* ó *pino* mancharía el dorado ó el plateado por causa de la resina que contiene

2°. *Plata oxidada.* — *Plata vieja.* — Se obtiene la plata que llaman *oxidada* sumergiendo el objeto algunos instantes en una solución caliente de sulfuro de potasio que produce una capa superficial de sulfuro de plata negro. Gastando esta superficie con un rascador de hilos de vidrio, se obtiene el tono llamado *plata vieja*

1056. **Nickelado.** — El *nickelado* ha tomado de algunos años á esta parte desarrollo considerable.

Obtiénese un depósito de nickel colocando las piezas como catodo en una solución á 8° Baumé de sulfato doble de nickel y de amoniaco.

El anodo soluble es una lámina de nickel.

La preparación de las piezas para el nickelado es tanto más minuciosa cuanto que generalmente son pulimentadas.

Su pulimento se efectúa gastando las asperezas por medio de un disco de madera que da unas 1500 á 1600 vueltas por minuto, y en cuyo contorno hay pegada una tira de cuero de búfalo que se espolvorea con esmeril.

Después se presentan las piezas á un cepillo circular que gira con la misma velocidad y que se unta con una mezcla de cal, de sebo y de colcotar.

Se les desengrasa con bencina y después se acaba dándoles brillo con una muñeca de paño que gira con análoga velocidad y untada también de materias grasas.

De manera que es absolutamente necesario desengrasar las piezas antes de introducirlas en el baño.

No se obtiene un desengrasado perfecto de los objetos pulimentados sino frotándolos con un cepillo doble, constantemente remojado en una lechada de cal, hasta que el agua los moje perfectamente. Entonces se les lava en agua abundante y se les lleva al baño.

Cuando su superficie empieza á ponerse mate, el grueso de nickel es suficiente. Secánse los objetos después de bien lavados y se les da brillo otra vez sometiéndolos á la muñeca de paño.

1057. **Depósitos metálicos diversos.** — 1°. *Platino.* — Se utiliza el baño siguiente

Platino transformado en cloruro.	10 gramos.
Fosfato de amoniaco.	100 —
— de sosa.	500 —
Agua destilada	10 litros.

Hácese hervir hasta que el precipitado que se forma se haya disuelto y se ponga incoloro el licor, dejándose de sentir el olor de amoniaco.

El anodo es una lámina de platino *que no se disuelve* en el baño.

Se opera con preferencia á 70° próximamente.

El depósito es siempre algo negro, pero el bruñido le da el aspecto del platino laminado.

La platinadura se usa poco. El uso del metal en cuestión como cubierta protectora de otro cuerpo análogo contra el ácido no es muy bueno, porque el depósito electroquímico es un metal poroso á través del cual sigue el contacto entre el cuerpo protegido y las sustancias corrosivas. El bruñido aplasta los poros y cubre mejor la superficie, aumentando la resistencia al ácido.

2°. *Estaño.* — Sobre el cobre y sus aleaciones se puede obtener un buen depósito de estaño de cierto grueso por medio del baño siguiente :

Agua destilada	5 litros.
Pirofosfato de sosa.	50 gramos.
Protocloruro de estaño fundido.	5 —

El anodo soluble es una lámina de estaño.

Desde hace algunos años se estañan los alambres metálicos que sirven para las canalizaciones eléctricas. Úsase el baño siguiente :

Lejía de potasa á 3° Baumé	250 litros.
Cianuro de potasio.	100 gramos.
Cloruro de estaño.	60 —

1058. **Manantiales de electricidad utilizados.** — En otra época se utilizaban las pilas de Bunsen y de Daniell; pero en la actualidad los establecimientos importantes emplean máquinas dinamoeléctricas (1043, 3°), construídas de modo que proporcionen gran intensidad bajo pequeña caída de potencial : 8 á 10 volts. El motor que hace dar vueltas á la dinamo pone en acción al mismo tiempo los tornos de *ahuecar*, de *pulimentar* y de *bruñir*.

En el caso de una instalación semejante, es necesario montar los baños en derivación, y poner en el circuito de cada uno de éstos una resistencia que se puede hacer variar fácilmente y un amperémetro.

También es de gran importancia colocar en el circuito general un *rompe-corriente*. Este aparato se compone de un electroimán por donde pasa la corriente; una lámina de hierro provista de un muelle antagónico cierra el circuito cuando está aplicada contra los polos del electro. Si la corriente de la máquina baja, por efecto de una disminución de rapidez del motor ó por cualquier otra causa, el muelle aleja la lámina y el circuito permanece abierto. Sin este aparato podría ocurrir que la fuerza contra-electromotora de los baños, resultante de la polarización de los eléctrodos, llegara á ser mayor que la fuerza electromotora de la dinamo, y los objetos colocados en el baño se desplatearían ó se desnickelarían.

1059. **Aplicaciones diversas.** — 1°. *Refinado del cobre y de otros metales.* — El cobre depositado electrolíticamente es muy puro, poseyendo elevada conductibilidad y gran ductilidad.

Obtiénesele industrialmente tomando láminas de cobre impuro como anodos de un baño de sulfato de cobre. Arreglando la corriente según convenga, el cobre se disuelve y va á depositarse sobre el catodo mientras que las impurezas caen al fondo de la cuba. El mismo procedimiento permite también refinar los restos

que se obtienen en la metalurgia del cobre. En Francia, Inglaterra, América, Italia y Alemania hay unas treinta refinerías que fabrican en conjunto unas 80 toneladas de cobre electrolítico por día.

En el refino del plomo y del zinc se usan métodos análogos.

2°. *Fabricación del bronce de aluminio.* — Se han puesto en práctica numerosos procedimientos para obtener el aluminio por electrolisis.

Procedimiento Cowles. — M. Cowles utiliza la electricidad como foco de calor y agente de descomposición al mismo tiempo.

En un horno eléctrico constituído por una cuba rectangular de ladrillos refractarios se introduce cobre, corindón y carbón, y después dos gruesos eléctrodos de carbón que van á terminar en el centro de la mezcla. Entonces se envía una corriente de 3000 ampères bajo 80 volts, la cual produce un arco voltaico donde se funde el corindón, que entonces es descompuesto por el carbón y la electricidad. El aluminio producido se alía con el cobre formando un bronce de aluminio. Esta operación dura una hora, obteniéndose 1 kilogramo de aluminio por 46 caballos-hora.

Procedimiento Heroult. — Es análogo al anterior; se le usa en la fábrica de Froges (Isère-Francia).

Procedimiento Minel. — Este procedimiento da aluminio puro por electrolisis, á 1000° próximamente, de una mezcla de criolita y de sal marina. La cuba es de fundición y se coloca en derivación sobre el catodo, de manera que constantemente esté cubierta de ligera capa de aluminio que la protege contra la acción del baño. Los eléctrodos son de carbón y debajo del catodo hay un vaso donde cae el aluminio.

Se opera con una corriente de 4 á 6 volts y de 30000 ampères por metro cuadrado de eléctrodo.

3°. *Fabricación de los hipocloritos.* — También se ha aplicado la electrolisis á la fabricación de los hipocloritos alcalinos para el blanqueo de las telas y de la pasta del papel, la fabricación del hidrógeno, el curtido, etc.

ACUMULADORES ELÉCTRICOS.

1060. **Pilas primarias y Pilas secundarias. — Acumuladores.** — De la Rive fué el primero en observar que láminas de platino utilizadas en transmitir la corriente de una pila ordinaria, ó *corriente primaria* á un líquido descomponible, retiradas después de este líquido y sumergidas en agua destilada, dan origen á una nueva corriente que es *inversa* de la primaria y que se llama *corriente secundaria* ó *corriente de polarización.* Matteucci demostró más adelante que esta fuerza electromotora inversa se debía á capas de burbujas de oxígeno y de hidrógeno, depositadas y *acumuladas* respectivamente en cada lámina.

Las pilas de dos líquidos fueron imaginadas por Becquerel para suprimir los efectos de la polarización. Planté trató al contrario de utilizarlas, recogiendo la corriente secundaria que de ahí resulta. Así constituyó electromotores de nuevo género, que llamó *pilas secundarias.*

La corriente observada por de la Rive es el tipo de las corrientes secundarias; el conjunto de los dos eléctrodos de platino y del baño de agua destilada constituye una *pila secundaria.* Toda pila de esta clase se llama también *acumulador*, porque *acumula* la electricidad bajo la forma de los productos químicos resultantes del paso de las corrientes primarias.

1061. Acumuladores y Baterías secundarias Planté. — *Principio.* — Habiendo reemplazado los eléctrodos de platino por otros de plomo, Planté observó que la fuerza electromotora secundaria correspondiente era más enérgica y constante que la de los demás metales, y que alcanzaba hasta el doble de la de un Grove ó de un Bunsen. No había pues más que aumentar la superficie de los eléctrodos, de modo que diminuyera su resistencia, para tener un acumulador de gran potencia.

Construcción de un acumulador Planté. — Primero arrollaba, alrededor de un cilindro de madera ó de metal, dos láminas de plomo separadas por dos ó tres bandas de caucho (fig. 959); después retiraba el rodillo interior y mantenía en su lugar

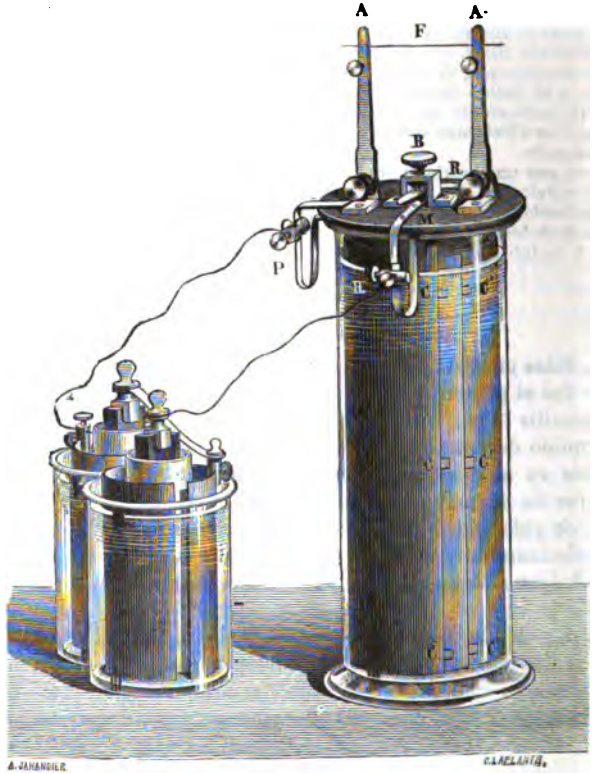


Fig. 959.

las espiras, interponiendo pequeñas traviesas de gutapercha reblandecidas por el calor. El par era introducido en un vaso cilíndrico de vidrio, lleno de agua acidulada (*en un décimo de su volumen*), y mantenido interiormente por pequeños calzos de gutapercha Este elemento secundario Planté tenía 1 metro cuadrado de superficie

Carga. — Se carga el elemento ordinario haciendo pasar por él la corriente de dos elementos Bunsen ó tres Daniell por lo menos. El trabajo de la corriente *se acumula* en forma de peróxido de plomo por una parte y por otra de plomo reducido y pulverulento. El límite de carga se alcanza, en un par *bien constituído*, cuando las burbujas de gas empiezan á desprenderse.

1062. **Baterías secundarias Planté.** — Planté construyó además una batería de acumuladores, llamada *batería secundaria*, pareando veinte de sus elementos (fig. 960). El aparato estaba provisto de un *conmutador*, que permite parear á voluntad los elementos, sea en tensión, sea en cantidad. Este último pareado

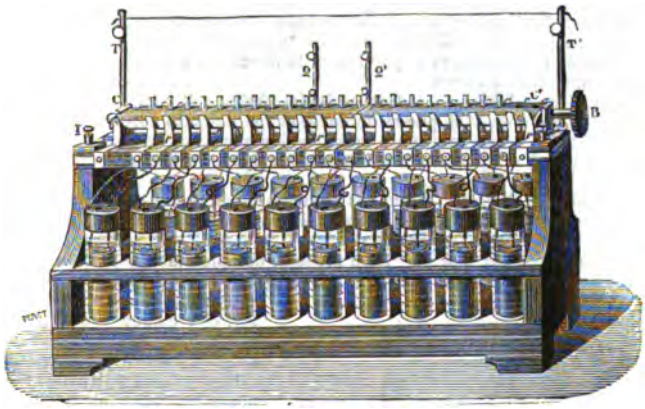


Fig. 960.

reduce á $\frac{1}{20}$ la resistencia de la batería, por lo cual se le ha utilizado para cargarla haciendo pasar á ella la corriente de la pila primaria. Cuando se ha efectuado la carga, se restablece el pareado en tensión; las fuerzas electromotoras de cada elemento se suman entonces, como en una pila de Volta, y así se tiene fuerza electromotora total 20 veces mayor que con un solo elemento.

1063. **Formación de los acumuladores. — Modificaciones del acumulador Planté.** — Todo acumulador debe someterse á una operación previa de las más importantes : la de la *formación*.

Consiste en peroxidar lo más profundamente posible la lámina de plomo positiva, y en transformar la lámina negativa, en la mayor parte posible de su grueso, en plomo reducido, esponjoso ó cristalino. Lógrase esto invirtiendo por intervalos el sentido de la corriente primaria durante la carga. La potencia del aparato depende en gran parte del modo como se ha conducido la formación.

1°. *Perfeccionamiento de Planté.* — M. Planté indicó un primer perfeccionamiento, que consiste, sea en calentar los baños de formación, sea en limpiar previamente las láminas de plomo, introduciéndolas de veinticuatro á cuarenta y ocho horas en un baño de ácido nítrico dilatado con agua (mitad de su volumen). El ataque por el ácido da á las placas cierta porosidad que facilita la acción interior de la corriente de carga.

2°. *Perfeccionamiento de M. Faure.* — M Faure propuso cubrir previamente las dos láminas de plomo con una capa de minio (Pb^3O^4), mantenida con láminas de fieltro ó de franela. Bajo la acción de la corriente primaria, el minio se transforma rápidamente en peróxido (PbO^2) en la lámina positiva, y en plomo esponjoso (Pb) en la negativa : de esta manera se obtienen rápidamente las dos láminas activas, y el acumulador queda formado pronto.

Los diversos modelos de acumuladores, ya muy numerosos, se refieren todos á uno de estos dos tipos. Se diversifican, sea en el primer tipo por las dimensiones ó la disposición de los eléctrodos de plomo; sea en el segundo por el método que hace las materias activas adicionales sólidamente adherentes á los eléctrodos. Entre los primeros citaremos el *acumulador Peyrusson;* entre los otros el *acumulador Gadot.*

1064. **Constantes de los acumuladores de plomo.** — Sean cuales fueren por lo demás la constitución y modo de formación de los diversos acumuladores de plomo, sus constantes son sensiblemente las mismas.

1°. *Fuerza electromotara.* — Durante los primeros instantes que siguen á la carga, la fuerza electromotora pasa con frecuencia de 2,5 volts; dos minutos después, ha bajado á 2, 10 volts; y durante las dos terceras partes de la duración de la descarga, permanece siendo superior á 1,9 volt.

2°. *Resistencia interior.* — Varía según el desarrollo de las placas, su separación y la concentración de los líquidos, pero alcanza apenas algunos *centésimos* de ohm

3°. *Cantidad total de electricidad almacenada.* — En un acumulador bien hecho, la cantidad de electricidad *almacenada* es de 10 amperes-horas por kilogramo de plomo. Puede recobrarse el 90 por 100 en la descarga, sobre todo cuando sucede sin interrupción á la carga.

4°. *Capacidad.* — La capacidad depende del régimen de rendimiento; disminuye cuando éste aumenta. Así, puede doblarse el rendimiento normal, calculado para una descarga en diez horas; pero entonces los acumuladores se vacían en tres ó cuatro horas. La capacidad varía según los tipos, desde 5 ampères-hora hasta 20 por kg.

5°. *Rendimiento eléctrico.* — Buenos acumuladores, bien hechos, bien cuidados y que se descargan en régimen normal, dan un rendimiento de 90 por 100 en cantidad y de 80 por 100 en energía

1065. **Acumulador Peyrusson.** — Este modelo, completamente reciente (fig. 961, está hecho de manera que con él se evita una de las causas de deterioro más activas, á saber: los cortos circuitos, que exigen generalmente vigilancia sumamente asidua en la dirección de estos aparatos.

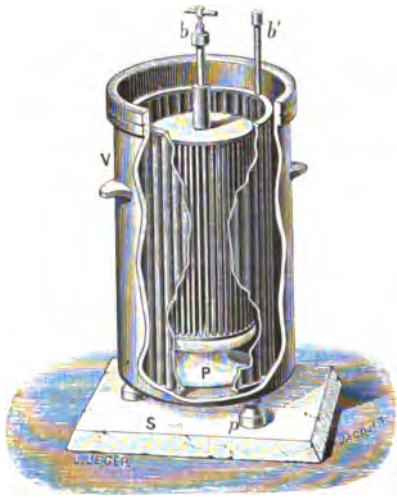


Fig. 961.

El eléctrodo positivo *b* está formado por un vástago central, alrededor del cual radian todas las láminas positivas. El eléctrodo negativo *b'* está hecho de láminas de plomo, plegadas y hendidas de tal modo que la acción eléctrica se ejerce sobre las dos caras. Estas láminas se encuentran unidas entre sí por bandas y dos anillos, uno superior é inferior el otro, de plomo antimoniado, que constituyen, gracias á soldaduras autógenas, un todo rígido de mucha solidez.

El acumulador no tiene más que un solo eléctrodo positivo de forma de cilindro y uno negativo representado por un cilindro hueco en el cual penetra el eléctrodo positivo; unas tapas de porcelana mantienen los dos eléctrodos á la distancia de algunos milímetros y hacen imposible todo contacto. Una peana de porcelana P aisla el eléctrodo positivo del vaso exterior, de asperón ó de vidrio que está cuidadosamente separado del suelo.

1066. **Acumulador Gadot.** — En este aparato, la materia activa (minio) está hecha pastillas, que se encuentran aprisionadas en alvéolos entre las mitades de una misma placa, que se encuentra subdividida en dos partes paralelas.

En el último tipo[1], llamado *de placas gemelas desmontables* (fig. 962), el aparato está combinado de manera que se eviten en cuanto es posible los cortos circuitos. Las placas están suspendidas por la parte superior, de modo que subsiste un

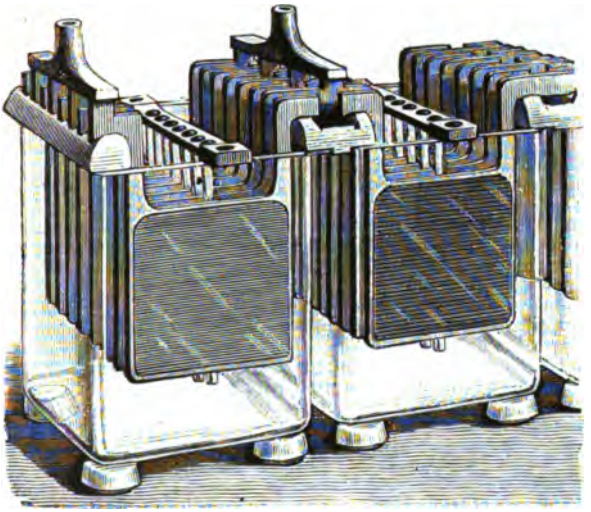


Fig. 962.

gran espacio vacío entre su borde inferior y el fondo de los vasos, donde pueden acumularse los detritus metálicos sin producir enlaces metálicos entre las placas (cortos circuitos).

Además, en este nuevo sistema, M. Gadot ha prescindido por completo de las materias sujetas á deformación ó deterioro, como la madera, la goma elástica, los pernos, tornillos, tuercas, etc.

1067. **Instrucción para conservar los acumuladores.** — Tomamos de las noticias de M. Gadot las instrucciones prácticas é indispensables para la conservación de una batería de acumuladores. Pueden aplicarse á todos los sistemas, con ligeras excepciones.

1°. El polo positivo de cada acumulador está generalmente marcado con rojo y el negativo de color negro. De tiempo en tiempo hay que limpiar cuidadosamente los contactos y examinar las abrazaderas y enlaces[2].

2°. Los acumuladores deben instalarse, sin tocarse unos á otros, en un piso de madera ó tablado perfectamente seco, haciendo que cada uno de ellos descanse sobre tres ó cuatro aisladores de porcelana ó vidrio.

Nunca se atribuirá demasiada importancia al aislamiento de los acumuladores es una condición esencial de su buen funcionamiento.

3. Se evitará ponerlos en una sala húmeda, oscura ó poco accesible; — por el contrario se hará todo lo posible por instalarlos de tal modo que se pueda visitarlos y conservarlos con facilidad.

4. El líquido está compuesto de 6 á 7 volúmenes de agua destilada ó de lluvia y de 1 volumen de ácido sulfúrico de azufre á 66°, todo bien mezclado con un pedazo de madera ó vidrio, porque una barra de metal sería atacada.

El ácido vendido en el comercio puede no estar exactamente á 66°: es pues

1. Privilegio de 5 de septiembre de 1893.

2. En algunos sistemas, como los *Tudors*, los *Peyrusson*, se les constituye con ventaja por soldaduras autógenas.

absolutamente necesario examinar la mezcla con el pesa-ácidos Baumé, que debe marcar 17° á 18° en el líquido una vez frío (densidad : 1,134 á 1,142).

El líquido no se echará en los acumuladores sino una vez bien fría y examinada la mezcla : deberá cubrir completamente las placas.

5. La carga de los acumuladores de un tipo determinado deberá efectuarse á una intensidad máximum, proporcionada á este tipo, y generalmente indicada por los constructores; no hay que pasar de ella nunca.

Cuanto á la tensión de la corriente de carga, diremos, como dato interesante, que debe ser al principio de unos 2,2 á 2,3 volts por acumulador (suponiendo que la batería esté montada en tensión) en circunstancias normales. — Por lo demás, esta tensión varía según el período en que se está : al principio de la carga es apenas de 2,1 volts, hacia la mitad de 2,2 á 2,3 volts, y hacia el fin puede subir hasta 2,4 volts sin pasar nunca de 2,6 volts.

Observaciones. — Puede reconocerse que un acumulador está suficientemente cargado cuando burbujea de manera perceptible.

Pero la manera más usada es darse cuenta del número de ampères-horas que se han puesto en el acumulador : debe exceder de 15 á 20 por 100 del número de ampères-horas que se trata de hacerle suministrar (en los límites de su capacidad naturalmente).

En resumen, un electricista cuidadoso hará uso apropiado de estos tres medios, que pueden servir para comprobarse mutuamente unos á otros.

6. La descarga de los acumuladores de un tipo determinado se efectuará á un régimen máximum indicado por el constructor; esta descarga puede efectuarse á intensidad menor, y esto es preferible para los acumuladores.

7. Toda descarga debe ser absolutamente interrumpida apenas baja á 1,8 volt la tensión de cada acumulador.

8. Es de la mayor importancia que las placas de nombres contrarios no se toquen nunca en un mismo vaso y que no se formen cortos-circuitos.

Puede estarse seguro de la existencia de un corto circuito cuando una vez cargado y en reposo el acumulador, no da resueltamente una tensión de por lo menos 1 volt, 95 á 2 volts.

Apenas se observa la existencia de un corto-circuito, se debe pasar con precaución una tira de madera por entre las placas, á fin de retirar ó de hacer caer al fondo del vaso el cuerpo que provoca este corto circuito.

9. Debe examinarse el líquido de los acumuladores con el pesa-ácidos cada tres ó cuatro semanas, reemplazando lo que puede faltar de líquido (por efecto de la evaporación ó de cualquier otra causa) con agua pura ó bien con ácido sulfúrico azufrado, según las indicaciones del pesa-ácido.

Hay que agitar el líquido con un palito antes del examen, que debe efectuarse después de una carga, cuando ha cesado el desprendimiento gaseoso.

10. Si los acumuladores tienen que permanecer sin funcionar algunas semanas ó meses, se retira el agua acidulada y se la sustituirá por agua pura, que deberá bañar completamente las placas, como el líquido acidulado.

CAPÍTULO XV

APLICACIONES INDUSTRIALES.

ALUMBRADO ELÉCTRICO.

1068. **Reguladores, bujías y lámparas eléctricas.** — Todo sistema de alumbrado eléctrico comprende dos órganos : el generador de electricidad y la lámpara.

El primer generador de electricidad usado para el alumbrado fué

una pila de Bunsen, formada con 40 elementos por lo menos. Desde el invento de las máquinas de inducción, ya no se usan pilas más que cuando no es posible proceder de otro modo, pues esto es al mismo tiempo el más incómodo y más costoso de los manantiales de electricidad. Las diversas máquinas de Gramme descritas anteriormente y otros muchos modelos son generadores de electricidad que pueden ser apropiados á todos los procedimientos de alumbrado. Los acumuladores se usan también mucho para esto; pero no dispensan del uso de máquinas dinamo-eléctricas, toda vez que con ellas hay que cargarlos.

Las *lámparas eléctricas* se dividen en dos categorías, según que utilizan el arco *voltaico* ó sencillamente la *incandescencia* de conductores atravesados por las corrientes.

Las que utilizan el arco voltaico son :

1°. Los *reguladores eléctricos;*

2°. Las *bujías eléctricas.*

Ambas tienen como función prevenir la extinción del arco, que ocurriría necesariamente por efecto del gasto y del alejamiento progresivo de los carbones. Lógrase esto en los reguladores por medio de un mecanismo regido por la misma corriente, que acerca las puntas opuestas de los dos carbones á medida que van consumiéndose.

En las bujías eléctricas se yuxtaponen paralelamente las barras de carbón, en vez de sobreponerlas, y se emplean *corrientes alternas* que, produciendo el mismo gasto en cada uno de los carbones, dejan siempre frente á frente las puntas.

Se ha utilizado la incandescencia que produce el paso de la corriente en los conductores resistentes, sea *al aire libre*, y entonces hay gasto más ó menos rápido por combustión, sea *en el vacío*, y en este caso el gasto disminuye mucho : de ahí dos especies de lámparas de incandescencia :

1°. *Lámparas de incandescencia con combustión*, hoy abandonadas;

2°. *Lámparas de incandescencia sin* combustión, cuyo uso se extiende cada vez más.

1069. **Carbones usados para el arco voltaico.** — Foucault reemplazó el carbón de leña que usaba Davy por carbón de retortas. Hoy los carbones se hacen con un aglomerado de coke en polvos, de negro de humo y de un jarabe de goma y azúcar muy espeso, que se seca á alta temperatura después de comprimido y pasado por la hilera. Dáseles la forma de creyones de dibujar de diámetros variables, cubiertos á veces de cobre ó nickel por vía de electrolisis, lo cual aumenta mucho su duración. El creyón positivo, generalmente colocado en la parte superior del arco, recibe á veces, según su eje, una *mecha* formada por un carbón de naturaleza diferente, y mucho más tierno que la parte exterior. El gasto de los carbones de mecha se efectúa de manera más regular. Sábese que el lápiz positivo se usa dos veces más de prisa que el negativo, cuando se usan corrientes continuas. El gasto de los dos creyones es el mismo si el arco está alimentado por corrientes alternas y *si los carbones son horizontales ;* en la posición vertical, el carbón superior se gasta algo más de prisa que el inferior y en la proporción de 108 á 100.

1070. **Fuerza electromotora del arco voltaico.** — Midiendo la diferencia de poten-

ciales entre los dos crayones de un arco voltaico, para separaciones l variables, se observa que varía con l desde 30 á 70 volts. Además se nota que está compuesto de una suma de dos términos, uno constante a y el otro sensiblemente proporcional á l; tiénese pues

$$e = a + Kl.$$

La constante a, — igual á unos 35 volts, — se ha llamado *fuerza electromotora del arco* y se atribuye por Thomson á la volatilización del carbono del carbón positivo. El segundo término es la caída de potencial ir debida á la resistencia r del arco.

Sea i la intensidad de la corriente que alimenta el arco, la potencia consumida por el arco tiene como valor ei watts. Si, por ejemplo, $e = 50$ volts é $i = 14{,}6$ ampères, el arco absorbe una potencia de 730 watts, es decir, de 1 caballo-vapor próximamente. En lo tocante á la cantidad de luz recogida es económico utilizar arcos que absorben mayor potencia.

1071. **Regulador de Foucault y Duboscq.** — Este aparato, inventado por Foucault, fué construído y perfeccionado por Duboscq. Fué el primer regulador *de punto luminoso fijo* que se inventó.

Los dos porta-carbones T, T' (fig. 963) están montados en barras dentadas, y dos ruedas dentadas concéntricas, p, p', arrastradas de manera continua por un mecanismo de relojería (r, g), imprimen á las dos barras movimientos en sentido inverso, de donde resulta el contacto de los dos carbones c, c': en este momento hay parada, y el circuito de la corriente queda cerrado. La corriente continua del generador llega al aparato por el tope R y sale por el R' después de haber seguido el camino siguiente: tope R, alambre q, carrete BB, barra T, carbones c y c', barra T', soporte S y tope R'.

Desde que pasa la corriente, el arco voltaico se enciende entre las puntas, al principio muy pequeño, y después cada vez mayor, á medida que los carbones se consumen.

Apenas se ha formado el arco, las puntas dejan de tocar una con otra, y el movimiento de relojería debería andar de nuevo para acercarlas; pero no es así gracias á un *electroimán* animado por el carrete BB. Mientras la corriente tiene intensidad suficiente, un contacto K es atraído y detiene el mecanismo, por medio de la palanca acodillada F'L y del tope l m, que descansa directamente sobre el regulador g del sistema. Pero así que la intensidad de la corriente se debilita por

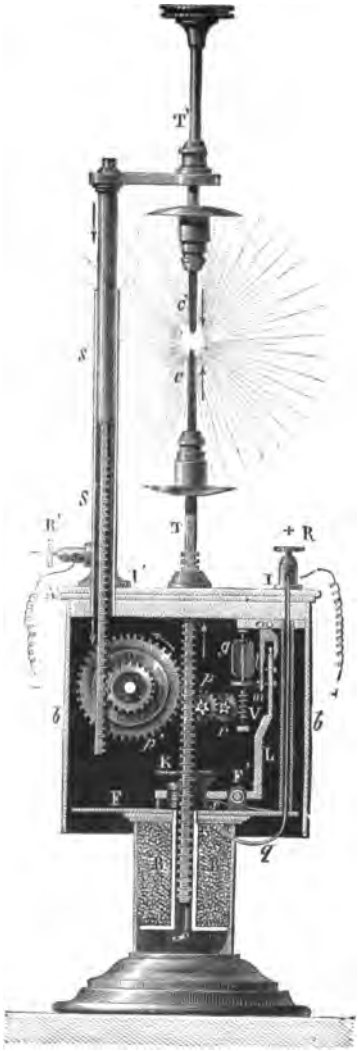


Fig. 963.

efecto del ensanche ó de la ruptura del arco, el contacto K es arrancado por el efecto de un muelle antagónico *r*, el mecanismo se descalza, y los carbones se acercan de nuevo hasta ponerse en contacto.

Este regulador se hizo para utilizar la corriente continua de las pilas. En este caso, como el carbón positivo se usa unas *dos veces más de prisa* que el otro, el punto luminoso no puede permanecer sensiblemente fijo sino en tanto que la punta positiva anda dos veces más que la negativa. Obtiénese fácilmente este resultado dando á la rueda dentada que gobierna la primera barra un diámetro doble del de la otra rueda.

1072. **Regulador Serrin.** — Es un regulador de la misma clase que el precedente pero más sencillo : no tiene muelle motor. El efecto del mecanismo de relojería se obtiene ahí directamente por el peso del porta-carbón superior.

1073. **Principio de los reguladores polifotos ó de división.** — Los reguladores del tipo precedente se llaman á veces *monofotos*, porque no se puede colocar más que uno solo en la corriente del electromotor. Denominanse reguladores *polifotos* los que son independientes uno de otro, de tal manera que pueden colocarse varios en el mismo circuito. Hay dos soluciones : la de M. Lontín, aplicada en los reguladores llamados de *derivación*, de Lontin, Mersanne, Gramme, etc., y la de Siemens, aplicada en las lámparas que se llaman *diferenciales*.

1°. *Reguladores polifotos de derivación.* — El carbón positivo A (fig. 964) y su porta-carbón CD, móviles alrededor del punto C, se encuentran en equilibrio entre dos atracciones contrarias, la de un electroimán S y la de un muelle antagónico *r*; el carbón negativo B está fijo. La corriente llega por C, penetra en el arco de A hacia B y se dirige después á otro regulador colocado en el circuito principal. Entre el punto C y el carbón B se encuentra instalada una derivación : ahí es donde se coloca el electroimán regulador. La cantidad de electricidad que entra en C en la derivación es *proporcional* á la resistencia del circuito principal CAB. Ahora bien, mientras el arco tiene escasa longitud, la resistencia del circuito principal es pequeña, y la corriente derivada que anima al electroimán no tiene bastante intensidad para provocar la aproximación del contacto M. Por el contrario, desde que el arco alcanza longitud exagerada, la intensidad de la corriente derivada y, por consiguiente la del magnetismo, aumentan, la resistencia del muelle *r* es vencida y el carbón se aproxima. Por lo demás, estas variaciones de intensidad no se producen al mismo tiempo más que en la derivación y en la porción correspondiente CAB de la corriente principal : más allá del punto B ya no se dejan sentir, y *no pueden influir en la marcha de los demás aparatos.*

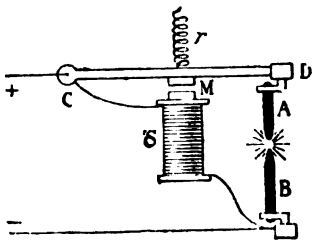


Fig. 964.

2°. *Reguladores polifotos diferenciales.* — Uno de los carbones A (fig. 965) está sostenido por una palanca oscilante; las oscilaciones son producidas por la diferencia de las atracciones de dos solenoides S y S', sobre un cilindro vertical de hierro dulce CC que equilibra el porta-carbón A. La corriente principal entra en el solenoide S, que es *de alambre grueso* y por tanto poco resistente; el solenoide S', que es de alambre fino y de una resistencia mucho mayor, está colocado en derivación Con un alejamiento normal

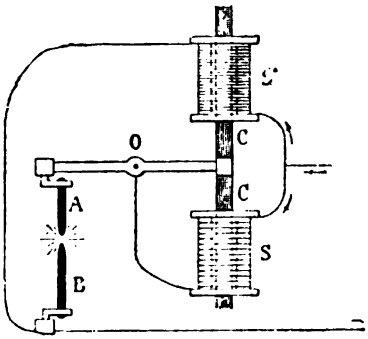


Fig. 965.

de los carbones, las atracciones se compensan, y la palanca es horizontal. Desde que la separación pasa de cierto límite, la resistencia del arco y por consiguiente la del circuito principal aumentan, y la intensidad de la corriente disminuye en S, mientras que crece en S' en la misma proporción; las atracciones varían en el mismo sentido, la palanca, atraída por S', oscila alrededor del punto O y los carbones se acercan : cuando han recobrado su separación normal, las resistencias de los dos circuitos recobran sus valores iniciales y las atracciones se equilibran de nuevo. El regulador Siemens fué el primero que se construyó sobre este principio.

1074. **Lámpara de arco Japy-Helmer** (*de punto luminoso fijo*). — Esta lámpara es el tipo del regulador diferencial que mantiene constante la razón de la diferencia de potenciales *e* en los topes y la intensidad I de la corriente que lo atraviesa.

Descripción. — Un solenoide S de alambre fino (fig. 966, I), colocado en derivación en los topes de la lámpara, aspira el núcleo de hierro dulce N ; un segundo solenoide S' de alambre grueso atravesado por la corriente principal, aspira el

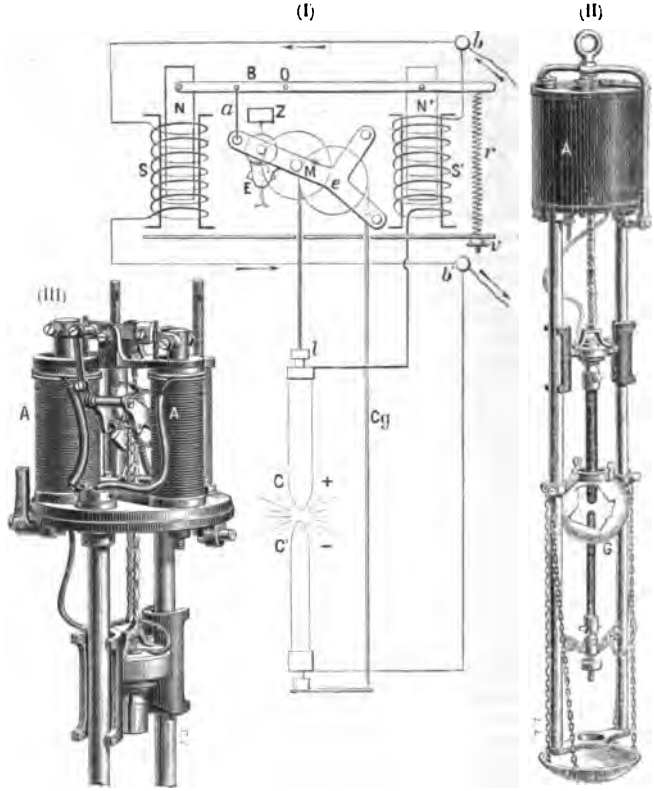


Fig. 966

núcleo de hierro dulce N ; las acciones ejercidas por los dos solenoides S y S sobre los núcleos N y N' se transmiten á un balancín B, en cuyas extremidades se encuentran suspendidos estos núcleos; este balancín B constituye un verdadero fiel de balanza.

El aparato está arreglado de tal manera que para el valor normal del cociente $\frac{e}{I}$, el balancín B esté en una posición de equilibrio casi horizontal. Los porta-carbones, guiados por los vástagos verticales (fig. II) están enlazados mecánicamente por medio de una cadena de Galle, que se arrolla sobre una rueda motora dentada regida por el mecanismo de relojería M.

El balancín B gobierna el escape de áncora del mecanismo M por medio de la pequeña biela de pareamiento *a*. Un muelle *r* mantiene inmóvil el escape cuando la lámpara no funciona; este muelle sirve al mismo tiempo para arreglar la lámpara : con tal fin se puede hacer variar su tensión mediante el tornillo *v* y su tuerca.

Funcionamiento. — Cuando se lanza la corriente, los carbones están separados; aquélla pasa por el solenoide de alambre fino S, el núcleo N es atraído hacia dentro del solenoide; el balancín B oscila alrededor del punto O, baja al mismo tiempo el mecanismo de relojería M, y como el escape se suelta, permite que los carbones se acerquen.

Apenas establecido el contacto, la corriente principal circula por el solenoide S' de alambre grueso; el núcleo N' es atraído y el balancín B oscila en sentido inverso : por este movimiento el escape queda calzado y el mecanismo de relojería se levanta, lo cual produce la separación.

Á medida que se van gastando los carbones, el solenoide N es atraído y vuelve de este modo cada vez el arco á una longitud tal que $\frac{e}{I}$ adquiera el valor determinado por un arreglo previo.

La figura II representa en perspectiva el regulador Japy-Helmer; la III expresa los pormenores del mecanismo.

1075. **Bujía eléctrica Jablochkoff.** — La primera solución del alumbrado por las bujías eléctricas se debe á M. Jablochkoff. Su bujía se compone de dos carbones *a* y *b* (fig. 967), verticales (de 2 á 4 milímetros de diámetro), dispuestos paralelamente uno al lado de otro. Á fin de que el arco voltaico no pueda saltar más que en los extremos, y no en dos puntos cercanos cualesquiera de los dos carbones, éstos se encuentran separados por un tabique aislador, llamado *colombín*, formado por una mezcla aglutinada de yeso y kaolín; sus puntas están enlazadas por un cebo *n*, hecho con carbón pulverizado, aglutinado con una disolución de goma.

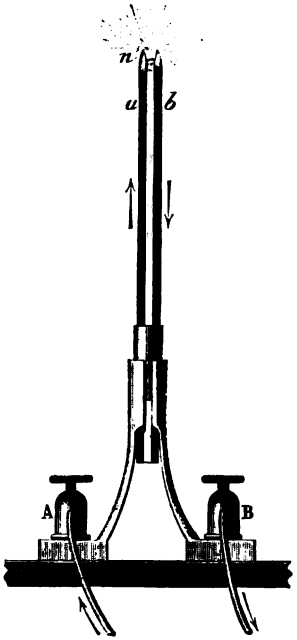


Fig. 967.

Se hace entrar y salir la corriente por los topes A y B : sube por el carbón *a*, inflama el cebo y baja por *b*; al mismo tiempo el arco voltaico se forma en *n*, y la extremidad del tabique aislador se volatiliza, bajando tanto como los carbones. Si se utilizara una corriente continua, el carbón positivo se gastaría dos veces más de prisa que el negativo y la extremidad *a* bajaría con mayor rapidez que *b*, lo que sería rápidamente causa de la ruptura del arco. Pero con corrientes alternas, los dos carbones se gastan sensiblemente de manera análoga. Así, el arco no se rompe, puesto que conserva una longitud casi constante, pero el punto luminoso baja gradualmente. Este movimiento no importa en el alumbrado de los teatros, de los grandes establecimientos, calles y plazas públicas; pero hace inaplicable el aparato á los faros y á las experiencias de física que exigen un punto luminoso fijo.

Las constantes de una bujía Jablochkoff de 4 mm. de diámetro en servicio normal, son las siguientes (según M. J. Joubert) :

Intensidad de la corriente : 8 á 9 ampéres.
Caída de potencial en los topes : 42 volts,
Potencia eléctrica : 34 á 39 kgm.

Las bujías de 25 cm. duran dos horas. M. Gadot ha suprimido el trabajo del cambio de bujía montándolas todas en derivación : la resistencia de los cebos, muy variable de una bujía á otra, basta para lograr que se enciendan sucesivamente.

1076. **Quemador Jamin.** — 1°. *Principio.* — El arco voltaico está fijo en los extremos de los carbones paralelos, sin mecanismo ni materia interpuesta, y eso mediante la corriente misma, por su propia acción electrodinámica. Con tal fin, la corriente circula varias veces alrededor de los carbones antes de entrar en ellos, de modo que las porciones que se encuentran frente á frente sean del mismo sentido (fig. 968). Es fácil ver, con sujeción á las leyes de la electrodinámica, que todas las partes del circuito contribuyen á impulsar el arco voltaico hacia las puntas, manteniéndolo en ellas.

2°. *Descripción detallada.* — La lámpara está sostenida por una placa de pizarra, que se puede adaptar á globos ó faroles (fig. 968). En esta placa se coloca igualmente, por una parte, hacia abajo una gotera de cobre, ancha pero poco gruesa (á fin de evitar las sombras) y hacia arriba, otra gotera de hierro dulce destinada

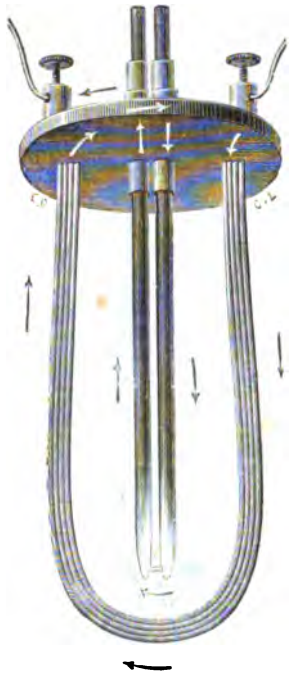


Fig. 968.

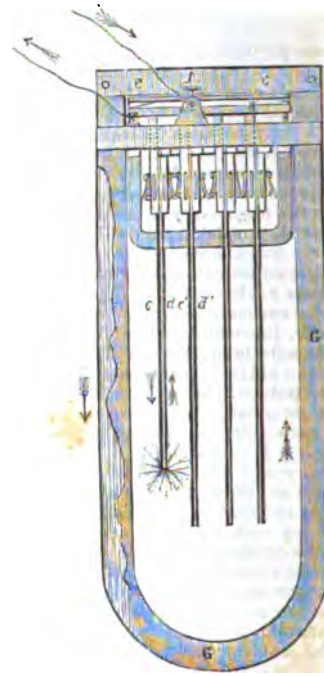


Fig. 969.

á imantarse y atraer una paleta móvil EF (fig. 969). La corriente alterna pasa primero por un alambre de cobre fino (diámetro $\frac{12}{10}$), doblado 15 ó 20 veces dentro de las dos goteras, y que constituye un circuito director análogo al multiplicador de un galvanómetro. En medio de este marco, y en su plano, es donde se colocan las *bujías*, que se reducen á *pares de carbones paralelos* entre los cuales va á saltar el arco; hay de ordinario cuatro pares (fig. 969). Introdúcese cada

uno de estos carbones en un tubo de cobre, donde se les mantiene verticalmente, con la punta hacia abajo, apretados por medio de un resorte. Se les usa tales como salen de la fábrica sin ninguna preparación previa. Ya hemos dicho que la corriente es la que está encargada de mantener fijo el arco voltaico en la punta de cada bujía.

Los carbones de la derecha (fig. 969) son móviles, los de la izquierda fijos. La movilidad de unos y la fijeza de los otros se deben á una posición particular de sus vainas. Las de los primeros están fijas en una paleta de hierro dulce EF, móvil como una palanca alrededor del punto O, y que las arrastra á las cuatro en su movimiento; las otras vainas son fijas.

3°. *Manera de encender y de volver á encender.* — En estado de reposo, la paleta es arrastrada por el peso de los carbones que lleva consigo y que baja hasta que uno de los móviles, de ordinario el más largo, vaya á topar con el carbón fijo que le corresponde. Si entonces se da paso á la corriente, ésta, después de recorrer el circuito director de la lámpara, llega á los carbones móviles y pasa á uno de los cuatro fijos. Apenas queda cerrado el circuito, la imantación se produce, la paleta EF es atraída y los cuatro pares de carbones se separan al mismo tiempo; tres de ellos permanecen fríos y oscuros, y el cuarto se enciende. El arco se produce ahí instantáneamente, y persiste mientras hay carbón que quemar, mantenido siempre entre las puntas por la acción electrodinámica del circuito director, y volviendo allí sin cesar cuando una causa interior lo ha expulsado. Así que la corriente deja de pasar, la imantación se desvanece, la paleta vuelve á caer y el contacto entre los carbones se restablece; cuando la corriente pasa otra vez, los carbones vuelven á encenderse y se separan como la primera vez. De modo que el acto de encender es *automático, instantáneo* y renovable á voluntad.

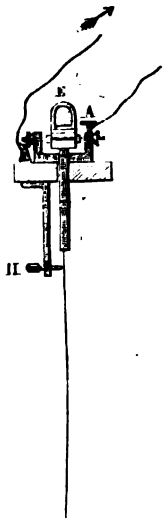


Fig. 970.

4°. *Reemplazo de las bujías.* — Cuando se ha consumido la primera bujía, precisa que otra le suceda. El paso del arco á la bujía siguiente se efectúa también *automáticamente*. Jamin imaginó varios sistemas, acabando por adoptar el siguiente, debido á M. Mondos, ingeniero de su laboratorio. En H, detrás de uno de los carbones y á escasa distancia (fig. 970) está dispuesta una punta metálica, enlazada metálicamente con el tope de salida. Desde que la bujía está suficientemente gastada para que el arco voltaico vaya á lamer la punta metálica, establécese espontáneamente entre ésta y el carbón cercano una derivación: la corriente vuelve entonces directamente al foco sin pasar por el circuito, la paleta vuelve á caer, dos carbones nuevos se ponen en contacto y la lámpara vuelve á encenderse como anteriormente.

5°. *Ventajas del quemador Jamin.* — Este quemador reune pues varias cualidades esenciales:

a. Cada bujía se enciende y se vuelve á encender *automáticamente*, tantas veces como se quiere.

b. No se necesita más que un solo circuito para todas las bujías cercanas.

c. Hay sustitución automática de cada bujía quemada por otra de las inmediatas.

d. No se usa en este quemador ninguna materia aisladora que presente, como en la bujía Jablochkoff, el doble inconveniente de alterar el color de la luz y de aumentar considerablemente el gasto.

1077. **Lámparas eléctricas de incandescencia sin combustión.** — El principio común á todos los sistemas consiste en hacer pasar una corriente, continua ó alterna, por un conductor *bastante delgado* y *bastante resistente* para ponerse incandescente, *bastante rígido* para no romperse ó doblarse por dilatación, y *bastante refractario* para no ser fundido ni volatilizado. Se encierra el conductor en un vaso ce-

rrado, al abrigo del aire en general, sea en el vacío, sea en un hidrocarburo, para sustraerlo á la combustión. Los primeros ensayos, efectuados con alambres de platino puro ó iridiado, dieron escasos resultados. Éstos no han sido satisfactorios sino con finos filamentos de carbón. Las lámparas que se fundan en este principio son ya numerosas : pueden citarse las de Edison, de Swan, de Lave Fox y de Hiram Maxim. No se diferencian unas de otras sino por la forma del filamento ó la fabricación del carbón. Describiremos la de Edison, inventor de este método de alumbrado.

1078. **Lámpara Edison.** — El carbón está contorneado á manera de lazada ó de herradura (fig. 971). Es un filamento de bambú, calcinado á alta temperatura, en un vaso cerrado [1].

Colocado el filamento en la ampolla, se hace el vacío en ésta, con bombas de mercurio, llevándolo hasta una aproximación de 1 á 2 centésimas de milímetro

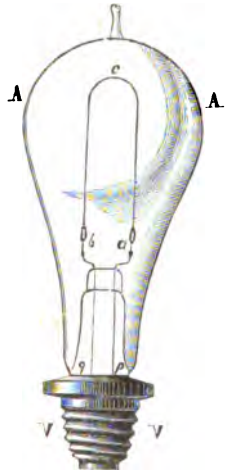


Fig. 971.

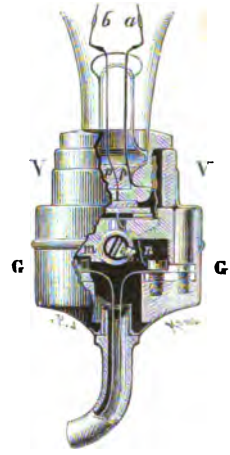


Fig. 972.

Los dos extremos de la herradura se ensanchan un poco y van á fijarse en dos pequeñas pinzas de platino *a* y *b*, terminación de alambres de platino *q* y *p*, que llevan la corriente eléctrica al carbón. Todo *se suelda* por medio de un depósito carbonoso seco, puro y carbonizado. Estos alambres de platino son mucho más gruesos que el hilo de carbón para que no se enrojezcan, pero así y todo se calientan y, por tanto, se ponen más gruesos cuando la lámpara está en función. Cuando se la apaga, esos alambres se adelgazan el enfriarse y vuelven á su diámetro primitivo.

Estos reóforos atraviesan en *p* y *q* (fig. 972) una masa de yeso que forma el pie de la lámpara y que sostiene un paso de tornillo V por donde se puede fijarla en

1. Á veces se *nutre* el filamento sumergiéndolo en un hidrocarburo gaseoso y haciendo pasar por él una corriente. El hidrocarburo se descompone al rojo y el carbono se precipita sobre el filamento, cubriéndolo con una capa grafitoidea dura y compacta. Como la elevación de temperatura es mayor en los puntos donde la sección es menor, ahí se efectúa el mayor depósito. De manera que la *nutrición* hace mas uniforme la sección.

un sostén apropiado, candelabro, mechero, etc. Los dos eléctrodos que conducen la corriente van á parar en dos topes metálicos *m* y *n*, ocultos en la envoltura. Basta con dar vuelta á una llave conmutadora colocada en la envoltura ó en un punto del circuito para encender ó apagar la lámpara.

Constantes de las lámparas de incandescencia. — Fabrícanse lámparas de incandescencia de todas dimensiones, que dan intensidades luminosas variables entre una pequeña fracción de bujía hasta muchos miles de ellas.

Las *lámparas normales* son de 16 bujías; funcionan ordinariamente con una corriente de 0,8 ampère y de 100 á 110 volts.

También se fabrican *pequeñas lámparas* de 1 á 8 bujías que funcionan á 0,8 ó á 1 ampère y bajo 3 á 30 volts; grandes lámparas de 150 á 1000 bujías, que funcionan bajo un voltaje de 50 á 100 volts y de una intensidad de 6 á 25 ampères.

Duración normal. — Una lámpara normal de 16 bujías debe tener una vida de 1000 horas.

Potencia normal. — La potencia absorbida por una lámpara de esta clase es pues

$$100 \times 0{,}8 = 80 \text{ watts}, \quad \text{próximamente } \frac{1}{9} \text{ de caballo vapor.}$$

Resistencia normal — Como se tiene $e = ri$, la resistencia de la lámpara en marcha es igual á

$$\frac{e}{i} \text{ ó } \frac{100}{0{,}8} = 125 \text{ ohms.}$$

CAPÍTULO XVI

APLICACIONES INDUSTRIALES.

—

TELEGRAFÍA.

1079. **Definiciones: telégrafos, telautógrafos y teléfonos.** — Una de las aplicaciones más asombrosas de la electricidad es, sin duda alguna, la transmisión instantánea y á grandes distancias del pensamiento humano, en sus dos modos de expresión, la escritura y el lenguaje articulado.

El conjunto de los métodos que resuelven el primer problema constituye la *telegrafía* y la *telautografía;* el conjunto de métodos que resuelven el segundo es la *telefonía:* los aparatos usados, en el primer caso se llaman *telégrafos* y *telautógrafos;* los que sirven en el segundo son los *teléfonos.*

1080. **Historia y principio de los telégrafos eléctricos.** — Desde el siglo último propusieron varios físicos que se correspondiera á distancia por medio de la electricidad suministrada por las máquinas eléctricas.

En 1811, Sommering imaginó un telégrafo fundado en el empleo de la electrolisis del agua como medio indicador.

En 1820, cuando todavía no era conocido el electroimán, Ampère, aplicando la experiencia de Œrsted, propuso corresponder por medio de agujas imantadas sobre las cuales se dirigiera una corriente: debían emplearse tantos alambres y agujas como letras hay

En 1837, Steinheil de Munich y Wheatstone de Londres construyeron telégrafos de varios alambres cada uno de los cuales actuaba sobre una aguja imantada; el foco de la corriente era un aparato electromagnético de Clarke ó una pila. Steinheil imaginó además *el regreso de la corriente por tierra*. Pero el telégrafo eléctrico no se hizo práctico sino por el empleo de electroimanes, imaginado por Wheatstone en 1840.

1081. **Clasificación de los aparatos telegráficos.** — Los sistemas telegráficos imaginados desde el origen de la telegrafía eléctrica son muy numerosos; pero hay relativamente pocos que hayan respondido á las exigencias de la práctica, y sólo nos ocuparemos de ellos.

Los sistemas que representan las letras del alfabeto por medio de signos convencionales pueden dividirse en dos grandes categorías:

1°. El sistema Morse y sus derivados, en los cuales las letras están representadas por las *repeticiones* y *combinaciones de dos signos elementales distintos é independientes;*

2°. Los sistemas en que cada signo elemental se diferencia por *el momento* en que se manifiesta; también se designan estos aparatos con el nombre de *aparatos de sincronismo.*

En los aparatos pertenecientes á estas dos categorías, las señales recibidas á la llegada pueden ser sencillamente *indicadas* por el aparato receptor (*aparatos de señales fugitivas*) y en este caso las operaciones de *traducción* y de *transcripción* incumben al agente que se destina á la recepción en el puesto de llegada.

Las señales recibidas pueden también ser *registradas* en forma de *trazos convencionales* por el aparato receptor mismo (*aparatos de señales registradas*), y el trabajo que incumbe al agente destinado á la recepción es el mismo que en el caso anterior. Bien es cierto que la inscripción automática de las señales dispensa de efectuar la traducción á medida de su llegada, y suministra un medio de comprobar los despachos útil en muchos casos.

Las señales recibidas pueden ser *traducidas automáticamente* é *impresas* en caracteres tipográficos por el aparato mismo (*aparatos impresores*), lo cual no deja al agente receptor más que el cuidado de recoger el telegrama que le ha llegado en esta forma.

Por fin, ciertos sistemas telegráficos, llamados *aparatos rápidos* ó *de gran rendimiento*, permiten efectuar con un hilo único número de transmisiones superior al que un solo agente puede transmitir ó recibir (aparatos de transmisión automática, y aparatos de transmisiones múltiples) [1].

1082. **Órganos diversos de un telégrafo eléctrico.** — Las partes esenciales de todo telégrafo eléctrico son:

1°. El *generador de corriente:* pilas, acumuladores ó dinamos;

2°. El *hilo de línea*, que transmite la corriente de una estación á otra;

3°. El *manipulador*, que regula las intermitencias de la corriente en la estación de partida;

4°. El *receptor*, que registra los despachos en la estación de llegada;

5°. Órganos accesorios: *refuerzos*, *translatores*, *traductores*, *campanillas*, *reóstatos*, *pararrayos*, etc.

1083. **Hilo de línea.** — Se distinguen las *líneas aéreas*, *subterráneas* y *submarinas.*

Línea aérea. — La línea aérea consiste en un alambre de *hierro galvanizado*, de 3 á 5 milímetros de diámetro, según la longitud de las líneas. También se usan conductores de cobre en aleación con fósforo, de 1 á 4 milímetros de diámetro. Estos alambres están soste-

1. Para la redacción de este capítulo hemos utilizado el excelente *Cours de télégraphie* de M. E. Baudot en la Escuela superior de telegrafía de París.

nidos por campanas aisladoras (fig. 973), montadas en consolas fijas en la parte superior de postes que se plantan á intervalos de 50 á 100 metros.

Linea subterránea. — Hablando en general, el conductor usado en las líneas subterráneas está formado por varios alambres de cobre (3, 5 ó 7) de pequeño diámetro, torcidos unos con otros de modo que formen cuerda. Ésta se cubre con una gruesa capa de gutapercha, constituida de ordinario por varias superpuestas y pegadas entre sí mediante la *composición Chatterton.* La gutapercha está protegida por una cubierta que se compone de pedazos de yute y cintas de algodón empapados en alquitrán de palo. El conductor así preservado es uno de los *hilos* de un *cable* que generalmente comprende 3, 5 ó 7, según los sitios donde se les va á colocar (cloacas, túnel, ó la tierra).

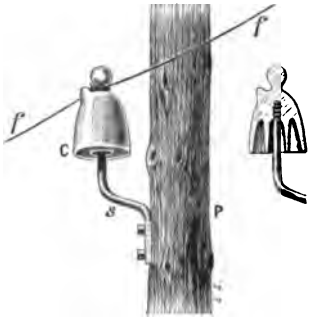


Fig. 973.

Los cables están protegidos á su vez de manera diferente. En cloacas y túneles se les da de ordinario una cubierta de plomo; cuando pasan á través del suelo se usa el *cable armado,* llamado así porque está provisto de una *armadura* de alambres de hierro arrollados en forma de hélice.

Las líneas subterráneas á grandes distancias se hacen con cables armados ó protegidos con cubiertas de yute y algodón, que pasan por tubos de fundición análogos á los que sirven para conducir el agua, y enterrados en el suelo á la profundidad de 1 metro próximamente. De distancia en distancia y en puntos conocidos se prepara una cámara para facilitar las pesquisas en caso de desarreglo ó accidente.

Linea submarina. — La línea submarina está constituída por un cable armado, de un conductor solo ó de varios, preparados como los

Fig. 974.

Fig. 975.

de las líneas subterráneas; los cables de gran longitud son ordinariamente de conductor único. La envoltura protectora de éste se hace con mucho cuidado mediante capas concéntricas de estopas

y cáñamo empapados en sulfato de cobre. Los alambres de hierro y de acero de la armadura exterior están cubiertos á su vez de cáñamo alquitranado (fig. 974 y 975), y la fuerza de esta armadura se proporciona, á los efectos destructores que deberá resistir en los fondos donde será sumergida; así es que se distinguen los *cables costeros* y los *cables de grandes profundidades*, que son más ligeros.

Observación. — Fuera de las causas de ruptura que resultan del frote continuo de los cables sobre las rocas, en los sitios donde corrientes continuas agitan el mar, y de las que pueden resultar del encuentro con el ancla de un navío, las líneas submarinas tienen que sufrir los ataques de la *carcoma*, un animal infinitamente pequeño que perfora la gutapercha á través de los intersticios de la armadura. Los agujeros que ese insecto hace son microscópicos; pero como en ciertas regiones se cuentan por miles, resulta una alteración apreciable del aislador del conductor, que se pone en comunicación con el agua del mar. Las descomposiciones químicas producidas en esos puntos por la acción de las corrientes eléctricas activan por lo demás la deterioración y dejan inútil en poco tiempo el cable.

1084. **Regreso por el suelo.** — En todos los sistemas de línea se ata del polo negativo de la pila en la estación de partida un alambre de cobre acabado en una placa del mismo metal, que se introduce en el agua de un pozo. El polo positivo que comunica con el hilo de línea termina en la estación de llegada, en una placa idéntica á la primera y que va también á sumergirse en el agua de un pozo. En el hilo de línea se produce la misma circulación eléctrica que si el circuito estuviera cerrado por un alambre de regreso. Esta disposición presenta pues la doble ventaja de evitar el empleo de dicho hilo, lo cual es una economía, y de hacer más pequeña la resistencia.

1085. **Generadores de corrientes.** — *Pila Callaud* y *Pila Meidinger*. — Entre las pilas usadas en el servicio telegráfico, citaremos en primera línea la de Caillaud, que ya hemos descrito (917). El elemento *Meidinger*, que es una variante del anterior, se usa en Alemania.

Pila Leclanché. — El elemento Leclanché, del modelo ordinario con barra de zinc y vaso poroso lleno de carbón y de bióxido de manganeso, se usa también para las líneas en que el tráfico es relativamente poco importante. Un rendimiento sostenido lo agotaría con rapidez y su fuerza electromotora sería demasiado variable para los casos en que es indispensable gran constancia. La pila puede prestarse sin inconveniente á un rendimiento bastante grande, cuando se la prepara al efecto.

Pila-bloque. — La *pila-bloque* es una especie de pila seca, ó por lo menos impermeable, que utiliza las propiedades del *cofferdam* (pulpa contenida en el coco), el cual absorbe y conserva cantidad de líquido activo suficiente para disolver una placa de zinc puro amalgamado de dimensiones bastante grandes. Comprende los mismos elementos que la pila Leclanché, pero envueltos en un lienzo acauchado y comprimidos fuertemente en una caja de madera, herméticamente cerrada y parafinada.

Citaremos también el elemento de *Lalande* y *Chaperon* (de óxido de cobre y solución de potasa cáustica) y el *Fuller* (zinc amalgamado, carbón, agua acidulada y bicromato de potasa), que emplea en Inglaterra la administración.

Observaciones. — 1°. *Uso de las dinamos.* — Es de prever, según los ensayos felices que se han practicado en América, Inglaterra, Francia y Alemania que, por lo menos en los grandes centros, todos estos generadores de electricidad serán sustituídos en breve por acumuladores, periódicamente cargados con máquinas dinamos.

2°. *Intensidad de las corrientes telegráficas.* — La corriente enviada por el puesto expedidor y calculada en el momento de salida tiene generalmente en Francia intensidad de 12 á 20 milli-ampères: esto es lo que se llama la *corriente de acción.* El que actúa sobre el receptor, la *corriente recibida,* alcanza apenas de 20 á 70 por 100 de la corriente de acción, por causa de las pérdidas que hacen sufrir las derivaciones, la longitud de la línea y el estado de la atmósfera; de modo que el receptor no recibe más que de 3 á 8 milli-ampères.

1086. **Pilas en cascada.** — No siempre es indispensable que cada línea telegráfica esté servida por una pila especial. El mismo foco puede utilizarse efectivamente para varias líneas; basta al efecto que su resistencia interior sea bastante pequeña para que su potencial en los puntos de contacto con las líneas no disminuya sensiblemente cuando el foco suministra un rendimiento máximo.

Estas condiciones se realizan con los elementos de pila de los modelos ordinarios, por una agrupación que á veces recibe el nombre de *pila en cascada* ó *de escalera de Amsterdam.* En estas pilas, que primero se usaron en Holanda, las diversas filas de elementos no tienen la misma longitud, y el conjunto representa una cascada ó una escalera.

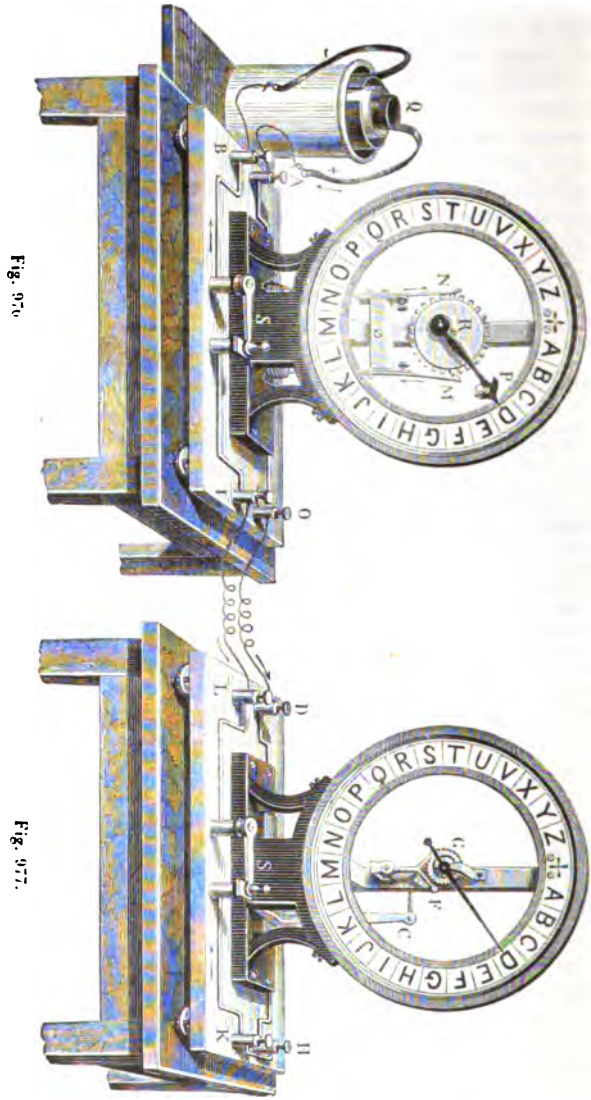
Supongamos que se trate de servir 10 líneas de escasa longitud, 6 de longitud media y 3 líneas cualesquiera, que exijan respectivamente fuerzas electromotoras de 8 volts, 16 volts y 25 volts, y por consiguiente en totalidad 251 elementos Callaud poco más ó menos: la agrupación en escala permite hacer ese servicio con menos de 100 elementos, y por tanto realizar una economía de más de 150 elementos.

1087. **Telégrafo de cuadrante ó de letras: sistema Bréguet.** — Existen varias clases de telégrafos de cuadrante. El representado por las figuras 976 y 977 es un aparato de demostración; pero el principio es idéntico al de los telégrafos Breguet instalados en las estaciones de caminos de hierro y en muchas oficinas telegráficas secundarias.

Compónese esencialmente de un manipulador (fig. 976) y de un receptor (fig. 977). Cada uno de estos aparatos se encuentra provisto de un cuadrante con las letras del alfabeto, á lo largo del cual se mueve una aguja. El experimentador hace girar con la mano la aguja de la estación de salida; pero la de la estación de llegada es movida por la electricidad.

Receptor. — La corriente, que sale de la estación de partida (fig. 976), á través del manipulador NRM y del hilo de línea OD, entra en el receptor (fig. 977) cuyo mecanismo oculto en esa figura se ve en la 978. Un electroimán fijo horizontalmente por un extremo,

atrae otra armadura de hierro dulce *a*, que forma parte de una palanca acodillada móvil en torno de su punto de apoyo *o*, mientras



que un muelle amorcillado *r* solicita la misma palanca en sentido contrario.

Cuando pasa la corriente, el electroimán atrae el brazo de palanca *a*C cuyo otro brazo *i* va á ejercer acción sobre una segunda palanca *d*, móvil en torno de un eje horizontal, y que gobierna una horquilla FF'. Cuando la corriente queda interrumpida, el muelle *r* vuelve á tirar de *a*C y al mismo tiempo todas las piezas que de *a*C dependen: de donde resulta para la horquilla un movimiento de vaivén que se comunica á una rueda G, provista de tantos dientes como letras, y que lleva en su eje una aguja indicadora. Según la inclinación de sus dientes, á cada oscilación doble de la palanca *a*C la rueda G es arrastrada un diente, siempre en el mismo sentido, por una de las ramas de la horquilla, mediante pernos que penetran entre los dientes.

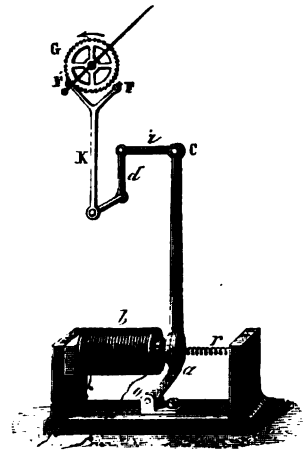


Fig. 978.

Manipulador. — Las intermitencias del electroimán se producen con el manipulador (fig. 976). La rueda R tiene un número de dientes igual al de letras del alfabeto más uno, y este último se encuentra á un intervalo, marcado por una cruz, entre las letras A y Z. Cuando se hace dar vueltas á la rueda R teniendo en la mano el botón P, la extremidad de la lámina N, está siempre en contacto con los dientes, dada su curvatura; por el contrario, como la lámina M termina en una punta rebajada, hay sucesivamente contacto y solución de continuidad. Por consiguiente, si se hace andar á la aguja P cuatro letras por ejemplo, la corriente pasa cuatro veces de N á O, y se interrumpe otras cuatro. El electroimán del receptor se hace pues cuatro veces atractivo y cuatro deja de serlo. Luego la rueda G ha girado cuatro dientes, y como cada uno de éstos corresponde á una letra, la aguja del receptor anda exactamente un mismo número de letras que la del *manipulador*.

Cuando ha terminado la palabra, se lleva la aguja B hasta la cruz, lo cual produce movimiento análogo en el cuadrante receptor.

Cado aparato está provisto de una *campanilla eléctrica*, por medio de la cual la estación de salida anuncia á la de llegada que se va á transmitir un despacho, y de un interruptor de corriente S.

1088. **Telégrafos de señales registradas. — Sistema Morse y sus derivados.** — 1°. *Manipulador*. — En el *aparato Morse* propiamente dicho, la señal se forma por el manejo de la *palanca-manipuladora*.

Consiste en una palanca acodillada *ab* (fig. 979), susceptible de oscilar entre un tope *b*, llamado *tope de reposo* contra el cual se

aplica en tiempo ordinario un resorte, y otro tope x, llamado *tope de trabajo*, sobre el cual va la palanca á tomar un punto de apoyo cuando la mano del operador la baja. La *duración* del descenso de la palanca, y por consiguiente la del contacto que de ahí resulta entre ella y su tope de trabajo, puede ser *breve* ó *larga:* así es como se han constituído los dos elementos del *código de señales Morse.*

Fig. 979.

2°. *Receptor.* — Las emisiones de la corriente de la estación de salida van á ejercer acción sobre el receptor de la estación de llegada. La palanca l que sostiene la armadura A del electroimán E (fig. 980 y 983) está provista de una prolongación u cuyo extremo encorvado se presenta por debajo y bastante cerca del filo de una

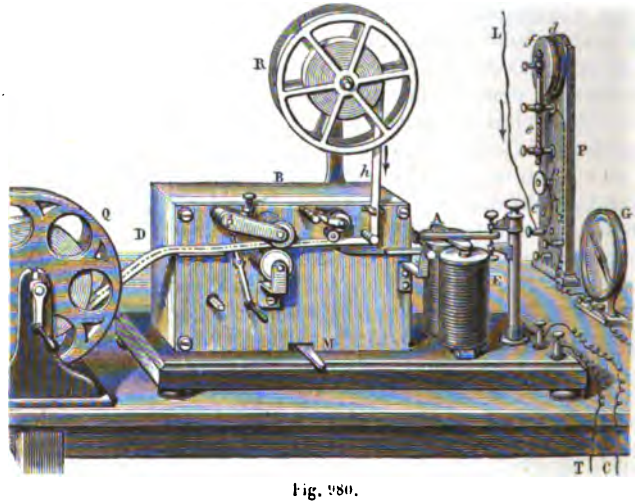


Fig. 980.

rueda delgada m; ésta se encuentra constantemente untada de tinta por su contacto permanente con un rodillo de fieltro e (fig. 983), empapado de tinta oleica negra ó azul. La rueda m es designada por el nombre de *moleta* y el rodillo e se llama *rodillo entintador*. Ambos giran por la acción de un mecanismo de relojería de que forman parte y que está contenido en la caja BD. Un rodillo de papel R.

dispuesto encima, suministra una tira continua de papel *h*, que va á ponerse en contacto de la extremidad de la lámina encorvada *u* y es movida con velocidad uniforme por dos cilindros C, C, que desempeñan el papel de laminadores (fig. 983). Concíbese que toda atracción de la armadura A por el electroimán E tendrá por resultado levantar la banda de papel hasta llegar á ponerla en contacto de la rueda entintada: ésta dará tinta suficiente para formar un trazo cuya longitud dependerá de la duración del contacto, puesto que la banda continúa su movimiento de progresión durante este tiempo.

Fig. 981.

Las señales breves efectuadas por medio del manipulador en la estación de salida, serán por tanto registradas en la de llegada por trazos de pequeña dimensión (puntos), y las señales largas por trazos mayores (*líneas*).

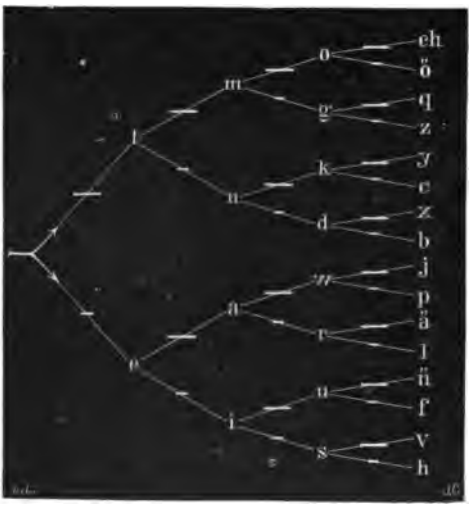


Fig. 982.

Existe gran número de aparatos que tienen todos por objeto depositar en la banda de papel líneas de tinta: el que acabamos de explicar es el modelo adoptado por la Administración francesa de Telégrafos. El modelo inglés hace descansar la moleta entintada sobre una palanca articulada que la armadura gobierna.

Observación. — El ritmo según el cual se efectúan las señales del aparato Morse está indicado por el esquema (fig. 981), en el cual las divisiones del eje de los tiempos O*x* corresponden á *décimosexto avos* de segundo. Esta es una velocidad media práctica.

3°. *Lectura de las señales Morse. — Cuadro del Comandante Perein.* — Un ingenioso cuadro (fig. 982), debido al comandante Perein, permite, sea la rápida traducción de las señales Morse, sea componer fácilmente las señales que representan letras que se trata de transmitir.

Para la composición de las señales que representan tal ó cual letra, se va del punto de partida, marcado por las flechas, á la letra que se desea representar, siguiendo las líneas de puntos que conducen á las señales, y tomando las que en el camino se encuentran.

Sea, por ejemplo, la letra *k*, á la cual no se puede llegar sino á través de los signos — — — que forman la señal compleja que en realidad sirve para representarla.

Supongamos ahora que se trate de traducir la señal compleja — — — —. Se parte de la flecha y se siguen las líneas que pasan sucesivamente por un punto, después por un trazo, luego por un segundo trazo, y finalmente un punto, y así se llega á la letra *p*, que en efecto es la indicada par le señal en cuestión.

En el Código Morse, los números están formados por 5 signos, y la puntuación por seis.

1089. **Instalación completa de una estación Morse** (*llegada y salida*). — **Operación.** — La palanca L del manipulador está enlazada permanentemente por su parte media (fig. 983) con el hilo de línea; además, cuando la mano del agente trans-

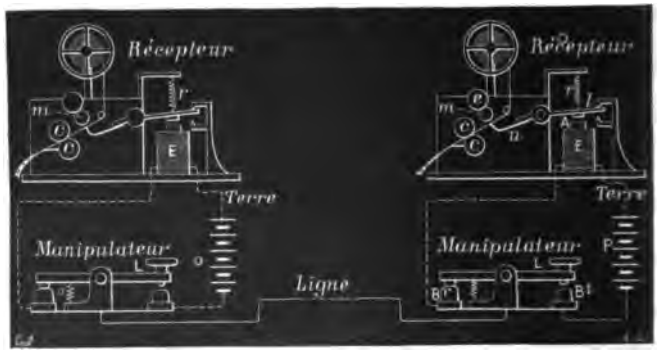


Fig. 983.

misor la baja, queda también en comunicación, por su tope de trabajo B_t con uno de los polos de la pila P, cuyo otro polo está *en el suelo*. De ahí resulta una cerradura del circuito de esta pila á través del hilo de línea y por consiguiente el envío de una corriente eléctrica á la estación de llegada.

Allí continúa el circuito de línea por el manipulador, por su tope de reposo B_r, por los carretes del electroimán E y se cierra en fin por el suelo. Al atravesar el electroimán, la corriente de la línea determina una atracción de la armadura A, que está montada sobre una palanca *l* articulada en *o*. Esta palanca se baja entonces; tiende el muelle *r* que lo mantenía levantado y, abandonando su tope

de reposo, va á ponerse en contacto con el tope de trabajo. Á partir de este momento es fácil ver que todos los movimientos del manipulador á la salida serán reproducidos fielmente por la palanca receptora *l*, pues cuando el empleado deje subir la palanca manipuladora, la corriente de la pila P dejará de ser enviada á la línea, y como la armadura del electroimán E deja de ser atraida, subirá por acción del muelle *r* hasta el contacto de su tope de reposo. Bastaría pues con observar los movimientos de la palanca receptora para traducir las señales efectuadas en la estación de partida; pero es preferible registrarlas.

Observación. — Se comprende fácilmente, según la disposición de los aparatos en cada estación, porqué no puede la corriente lanzada desde la estación de partida influir en el receptor de la misma estación.

1090. Órganos accesorios. — La instalación de un puesto telegráfico completo exige gran número de órganos accesorios cuya forma varía mucho, según los sistemas. Describiremos los tipos más sencillos de los accesorios más importantes.

1°. *Pararrayo.* — El *pararrayo* es un aparato destinado á preservar al telegrafista contra las descargas eléctricas en momentos de tempestad. Vésele en su sitio adaptado á una tabla vertical P, cerca de un receptor Morse, en la fig. 980.

Dos topes de latón P y Q (fig. 984) están en comunicación, el primero con el hilo de línea L, el segundo con los aparatos por el alambre A. De un tope á otro va un hilo de ebonita *ab*, donde se arrolla un alambre de hierro muy delgado,

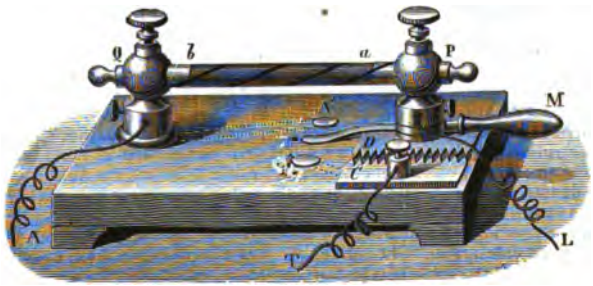


Fig. 984.

que lleva la corriente de P á Q. Al pie del tope P hay una placa de cobre D, dentada en toda su longitud; lateralmente y muy cerca hay otra placa idéntica C que comunica con la tierra por el alambre T.

Cuando por la acción de una tempestad llega la tensión eléctrica á ser bastante grande en el hilo de línea para producir chispas temibles, la placa D, que se encuentra en el circuito da salida por sus puntas á la electricidad hacia la lámina C y desde allí al suelo, sin riesgo para los telegrafistas inmediatos. Si, no obstante esta descarga continua, la corriente llega á ser demasiado intensa, el alambre de hierro arrollado de *a* á *b* se calienta hasta fundirse, cortando así toda comunicación eléctrica entre los aparatos y la línea.

Puede según se quiera ponerse el pararrayo fuera del circuito, valiéndose al efecto de un conmutador de manecilla M.

Observación. — Los pararrayos, que bastan para preservar á los empleados, son insuficientes para detener las corrientes accidentales que las auroras boreales, las tormentas magnéticas ó las acciones telúricas excitan en los hilos, corrientes que á veces llegan á ser bastante intensas para perturbar completamente la transmisión de los despachos.

2°. *Campanilla eléctrica (de temblador).* — La *campanilla eléctrica* es un pequeño aparato que sirve para avisar á la estación con que se va á comunicar. Háceseles

de varias clases; describiremos (fig. 985), la *campanilla de temblador*, usada también por los puestos telefónicos y en la economía doméstica.

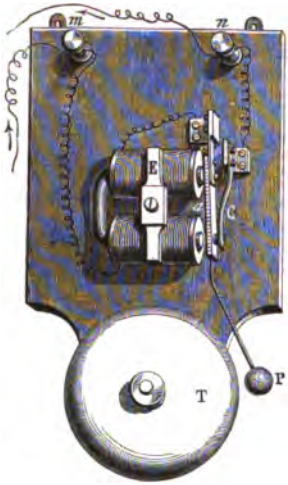


Fig. 985.

Una tableta dispuesta verticalmente sostiene un electroimán E, á donde llega, por un tope *m*, sea la corriente de línea, sea el de una pila local. Desde allí pasa la corriente á una lámina elástica de acero *c*, que está sostenida por la armadura *a* del electroimán, y luego á una lámina de latón C, que está en contacto con la armadura, y vuelve á la pila por el tope *n*.

Cada vez que la corriente penetra en el electroimán, la armadura es atraída y arrastra consigo un martillo P, que pega en la campana T y la hace sonar. Pero en el momento del choque cesa el contacto entre la armadura *a* y la lámina C y, como la corriente queda abierta, el electroimán se vuelve inactivo; pero la lámina de acero *c* vuelve á poner la armadura en contacto con la lámina C, la corriente pasa de nuevo, y así sucesivamente, con gran rapidez, mientras la corriente llega al aparato.

1091. **Refuerzos.** — Si los dos puestos que corresponden están muy lejos uno de otro, puede suceder que la corriente deje de tener fuerza bastante para hacer funcionar las piezas que inscriben el despacho. Entonces se recurre á un *refuerzo* órgano accesorio que, recibiendo la corriente de línea, introduce en ella una *pila local*, que sustituye á la pila de la estación de salida para mover el mecanismo del receptor.

La corriente de línea, que entra en el aparato por el tope L (fig. 986), se dirige á un electroimán E, desde donde va á la tierra por el tope T. Ahora bien, cada vez que el circuito se cierra, el electroimán atrae la armadura A, fija en la parte inferior de una palanca vertical *p*, que está unido con un eje horizontal que gira entre dos tornillos de punta.

A cada oscilación, la palanca *p* va á chocar por su parte superior contra un botón *n*, y en este instante la corriente de la pila local va á animar al electro-

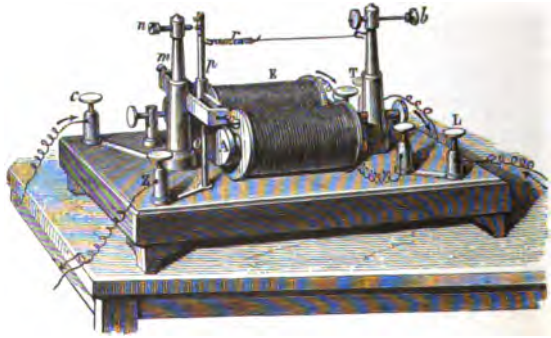


Fig. 986.

mán del receptor pasando por el tope *c*, la columna *m*, la palanca *p*, el vástag *o* y el tope Z, desde donde sale por el hilo T (fig. 980) para volver á la misma pi local. Después, cuando la corriente del hilo de línea se interrumpe, como ya e

electroimán del refuerzo no está en actividad, la palanca *p*, arrastrada por un resorte amorcillado *r*, se separa del botón *n* (según indica la figura 986), y la corriente de la pila local deja de pasar. Se ve pues que el refuerzo transmite al receptor exactamente las fases de paso y de intermitencia del manipulador del puesto expedidor.

Refuerzos polarizados. — En ciertos casos pueden emplearse *refuerzos polarizados*, llamados así porque su armadura móvil es un imán. De esta manera, según el sentido de la corriente emitida, se provoca una atracción ó una repulsión de la armadura.

1092. **Telégrafos impresores. — Principio del sistema Hughes.** — El sistema Morse es el mejor de los telégrafos en lo tocante á sencillez y duración; pero no el más rápido. En efecto, con él hay que hacer tres señales por letra. Así es que se ha procurado combinar sistemas que den *una letra* por cada emisión de corriente: esto es lo que se llama *telégrafos impresores*. El más conocido es el del profesor americano Hughes.

El mecanismo de este telégrafo es bastante complicado, pero su principio muy sencillo. En las dos estaciones se encuentran dos aparatos de relojería que deben andar acordes, con sincronismo perfecto, de modo que determinen el funcionamiento simultáneo del manipulador y del receptor. Este último consiste esencialmente en un disco metálico horizontal, que lleva en su contorno, hechas en relieve, las letras del alfabeto: es la *rueda de los tipos*. Esta gira de manera continua cerca de una banda de papel que se desarrolla como en el receptor Morse. Un electroimán, que se anima cada vez que se emite la corriente por el hilo de línea, comprime el papel contra la rueda de los tipos: la letra que pasa en este momento, y que constantemente está impregnada de tinta grasa, se imprime entonces sobre la banda. La emisión de la corriente se efectúa, en la estación de salida, por medio de un *manipulador especial*, que se compone esencialmente de un teclado, análogo al de los pianos, que lleva grabadas en sus teclas las mismas letras que la rueda de los tipos. Una vez arreglados los dos aparatos, el expeditor envía sucesivamente, tocando en el teclado, las letras de que el despacho se compone, y éstas se imprimen simultáneamente en los dos puestos. Entonces las bandas impresas son recortadas, pegadas en una hoja de papel y entregadas á los destinatarios.

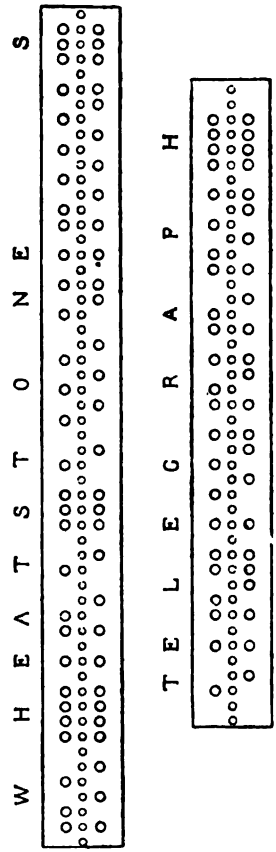


Fig. 987.

1093. **Telégrafos de transmisión rápida.** — El sistema Hughes no es bastante expeditivo todavía, por lo menos para las grandes líneas, dada la importancia del servicio telegráfico. Ha habido pues que inventar varios sistemas para acelerar, en gran proporción, la transmisión de los despachos por un mismo hilo de línea. Estos diversos sistemas pueden clasificarse en tres grupos:

1°. Los *transmisores automáticos*, cuyo tipo es el *transmisor Wheatstone ó Jacquard eléctrico;*

2°. Los *transmisores múltiples*, que tienen como tipo el *telégrafo Baudot;*

3ª. Los sistemas de transmisión simultánea, conocidos por los nombres de *duplex*, *diplex* y *quadruplex*.

1094. **Jacquard eléctrico.** — *Principio.* — Se preparan de antemano los despachos fuera de la línea, y después se les transmite por series, de manera continua, y *automáticamente*.

Aparato Wheatstone. — El aparato inventado por Wheatstone se parece exteriormente á una tejedora Jacquard, por lo cual se le ha dado el nombre que lleva. El órgano que sirve para preparar los despachos se llama el *perforador*, porque esta preparación consiste en *perforar* las bandas de agujeros que se encuentran alineados y espaciados de modo que sea posible la transmisión en caracteres Morse (fig. 987). La línea de agujeros del centro sirve para el engranaje de un disco dentado que, al girar, arrastra consigo y desarrolla la banda de una manera continua. Las otras dos líneas de agujeros forman los *puntos* y *trazos* del alfabeto Morse : dos agujeros situados uno frente á otro forman un punto: dos agujeros en diagonal indican un trazo. Por consiguiente, un despacho *perforado* deberá ser traducido primeramente en caracteres Morse, antes de ser impreso en letra ordinaria.

1095. **Transmisores múltiples.** — **Aparato Baudot.** — El principio de estos aparatos, entre los cuales es el de Baudot el más perfecto, consiste en lo siguiente : dividir la duración de transmisión en intervalos regulares y periódicos, cada uno de los cuales se consagra á un manipulador distinto; cierto número de empleados pueden utilizar por consiguiente el hilo de línea por turno, de manera que mientras los tiempos de actividad y de reposo se suceden para ellos periódicamente y con rapidez, el hilo de línea permanece en actividad de manera continua.

El telégrafo Baudot, fundado en este principio, es una maravilla de precisión y velocidad. Permite enviar 6 despachos distintos, por un mismo alambre, en el tiempo que se tardaría en imprimir uno solo con el aparato Hughes ordinario. El órgano esencial es un *distribuidor*, que pone por turno y periódicamente en comunicación con el hilo de línea 6 manipuladores Hughes; de esta manera, en el primer período se manda la primera letra de 6 despachos; después, en el segundo, la segunda letra de los seis depachos, y así sucesivamente hasta la última; cada período dura el tiempo necesario á cada empleado para preparar el envío de una letra, de manera que no se pierde ni un instante en el funcionamiento del hilo de línea. En la estación de llegada hay otro *distribuidor* que funciona en sentido inverso del primero, y distribuye sucesivamente á 6 receptores Hughes distintos una letra de cada uno de los 6 despachos diferentes.

1096. **Sistemas duplex, diplex y cuadruplex.** — Estos sistemas no están constituídos por aparatos especiales, como los anteriores, sino por métodos de transmisión simultánea que se pueden aplicar á todos los telégrafos.

El *duplex* permite *transmitir simultáneamente por un mismo hilo dos despachos en sentidos contrarios.*

El *diplex* permite *transmitir por un mismo hilo dos despachos en el mismo sentido.*

El *cuadruplex* consiste en una combinación de los dos anteriores, que permite *transmitir por un mismo hilo cuatro despachos*, dos en el mismo sentido y dos en el contrario. Esta organización se usa en Inglaterra y Norte-América.

Descripción esquemática de un duplex. — El principio de esta disposición es hacer de modo que la corriente emitida por la estación de salida no actúe sobre el receptor de la misma, que necesariamente atraviesa para ir á la línea, sino únicamente sobre el receptor de la otra estación. Las soluciones de este problema son numerosas; he aquí una de las más interesantes, que es una aplicación del puente de Wheatstone (900).

En cada estación hay una pila P (fig. 988) uno de cuyos polos está en el suelo, comunicando el otro con el manipulador M. Á partir del manipulador, la corriente se bifurca en dos ramas, AB, AC por una parte, y A'B', A'C' por la otra; Entre B y C de una parte y B'

y C′ por otra se echa el puente donde se coloca el galvanómetro. Por fin, las ramas AB y A′B′ enlazan con el hilo de línea, mientras que las AC y A′C′ van á la tierra.

Es posible, según se sabe, proporcionar las resistencias en AB y en AC, hasta que la intensidad de la corriente sea nula en el puente. Reconócese que es así cuando la aguja del galvanómetro queda en el cero. En este momento ya sólo falta reemplazar el galvanómetro por el receptor, y queda montado el duplex.

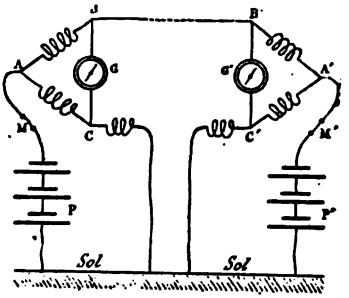


Fig. 988.

1097. **Comparación de los diversos telégrafos en lo relativo á rapidez de transmisión.** — En el cuadro siguiente van consignados los números de despachos (de 20 palabras) enviados en una hora á través de una línea de 400 á 500 kilómetros.

Telégrafo Morse, montado en simple.	25
El mismo, — en duplex	45
Telégrafo Wheatstone, montado en simple.	90
El mismo, — en duplex.	160
Telégrafo Hughes, — en simple.	60
El mismo, — en duplex.	110
Telégrafo Baudot, de seis teclados.	240
Espejo simple.	30
— en duplex	50
Sifón-recorder simple.	30
— en duplex	50

TELEGRAFÍA SUBMARINA.

1098. **Anomalías de la transmisión en las líneas submarinas.** — La mayor parte de los aparatos usados en la explotación telegráfica de las grandes líneas submarinas, son Morse ordinarios ó sistemas que usan el Código de señales de ese inventor. — Los *transmisores* de estas señales son idénticos en principio á los que se usan en el servicio de las transmisiones por las líneas aéreas: pero los *receptores* deben reunir condiciones especiales.

Hay que prever dificultades serias en las transmisiones eléctricas cuando se usan conductores preparados como los cables submarinos, cuya capacidad es enorme, cuando su resistencia es ya grande.

He aquí efectivamente lo que se observa en la extremidad de un cable que une Irlanda con América y que tiene 3500 kilómetros de largo, cuando la otra extremidad es puesta en comunicación con un manantial eléctrico: durante 2/10 de segundo, nada; después, una corriente excesivamente débil, apenas perceptible, cuya intensidad crece progresivamente, al principio con rapidez, luego con mayor lentitud, hasta hacerse uniforme al cabo de unos 3 segundos.

Cuando se interrumpe la comunicación del cable con el manantial eléctrico, la intensidad de la corriente recibida decrece progresivamente y según la misma ley.

Estas observaciones han podido efectuarse por medio de un aparato de medida sumamente sensible, inventado por Sir W. Thomson (lord Kelvin), y cuyas prin-

cipales disposiciones se indicaron en el párrafo 983. Es un *galvanómetro de espejo* que fué el primer receptor de la telegrafía submarina.

1099. **Galvanómetro ó receptor de espejo** (*de Thomson*). — Compónese de un carrete formado por gran número de vueltas de alambre fino, dentro del cual está suspendido, entre dos hilos de capullo, un pequeñísimo espejo plateado, en cuyo dorso se pega un imán minúsculo. Este se encuentra formado por un pedazo de muelle de reloj que apenas tiene algunos milímetros de largo (fig. 989). Á caballo en el carrete hay un imán encorvado que sirve para dirigir el pequeño imán y su

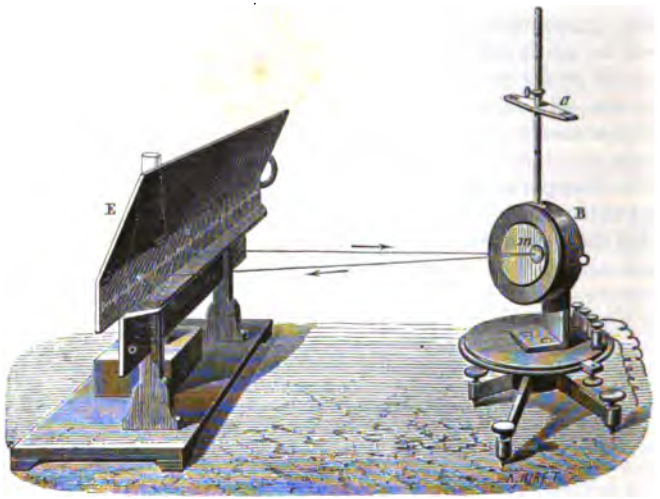


Fig. 989.

espejo, que reunidos no pesan arriba de 20 centigramos. El foco luminoso es una lámpara ordinaria cuyo vidrio se reemplaza por un tubo de metal ennegrecido exteriormente y plateado por dentro. — Una estrecha abertura practicada en este tubo deja pasar un delgado hilito de luz que después de reflejarse en el espejo, va á proyectarse, en forma de línea vertical blanca llamada *spott* (mancha), sobre una pantalla de vidrio sin pulimentar ó de papel untado de aceite detrás del cual permanece el empleado encargado de leer las señales.

Los movimientos más ó menos rápidos y los cambios de posición sucesivos de la mancha, son interpretados por este empleado, que distingue así las señales del Código Morse efectuadas por medio de un manipulador de dos palancas.

La lectura de estas señales es bastante difícil y exige atención sostenida que á la larga cansa al lector. Este permanece en la oscuridad, con la vista fija en su pantalla, anunciando en alta voz las letras que traduce á medida de su llegada. Un escribiente situado en las inmediaciones las copia.

El rendimiento de un cable servido por un *espejo* puede llegar fácilmente á 20 ó 25 palabras por minuto con empleados muy prácticos.

1100. **Sifón-recórder de Thomson.** — Á más del cansancio que el aparato de espejo impone á los empleados, presenta los inconvenientes de los de señales fugitivas, así es que se consideró como un progreso importante el invento de Sir W. Thomson (hoy lord Kelvin) del *sifón-recórder* (registrador), que permite apuntar en una tira de papel las desviaciones del órgano móvil del aparato receptor, según podría hacerse con un dispositivo fotográfico, pero en condiciones mucho más prácticas.

El sifón-recórder comprende dos partes distintas que deben examinarse sepa-

radamente. — La primera es el *sistema electromotor* y la segunda el *sistema registrador*.

1°. *Sistema electromotor.* — El sistema electromotor del sifón-recórder es el receptor mencionado antes con el nombre de galvanómetro de espejo.

Se le realiza en la forma que da á comprender la figura 990, I, II y III. Un carrete ligero de forma rectangular *pp*, formado por gran número de vueltas de alambre fino, cuyos extremos terminan respectivamente en *e* y *s*, se suspende y mantiene con hilos de capullo Hf entre las ramas de un poderoso imán NS, á escasa distancia de las piezas polares. — Un trozo de hierro X fijo en la platina de cobre K, á igual distancia de estas dos piezas, tiene por objeto acortar las líneas de fuerza magnéticas, concentrándolas en los dos espacios donde deben moverse los dos lados largos del carrete. Los hilos de capullo *f*, atados en la parte inferior de aquél, se mantienen tensos hacia abajo mediante pequeñas masas pesadas *m*, que el simple apoyo contra una pared *z* algo inclinada basta á inmovilizar. Entre estos dos hilos de tracción, el carrete mantiene una especie de índice formado por una pequeña lámina de aluminio *l*, destinada á revelar todos los movimientos que le impriman en torno de su eje vertical las corrientes que lo atraviesen.

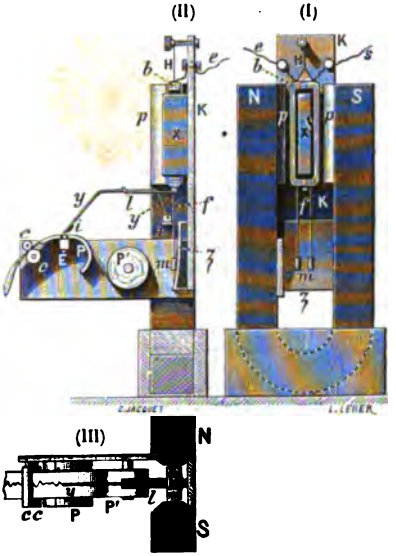


Fig. 990.

2°. *Sistema registrador.* — Ahora se trata de registrar los movimientos ejecutados por el índice *l*. La disposición representada (fig. 990, I, II y III) permite ver un tubo capilar de vidrio *yy*, adherido con cera al índice *l*, encorvado hacia sus extremos de modo que le sea posible penetrar por uno de éstos, *y*, en un pequeño vaso *a* que contiene tinta muy fluida, y rozar por el otro con la superficie de una tira de papel mantenida tensa por el soporte-tambor PP'.

Una vez lleno el tubo de tinta por primera vez, mediante la aspiración efectuada en su extremo *y*, constituye un *sifón* que llevará toda la tinta del vaso *a* hasta la extremidad que se encuentra en contacto con el papel, siempre que éste se mueva, pues la capilaridad del tubo se opondría á una salida continua.

Fig. 991.

Una vez bien comprendido esto, es fácil concebir que las oscilaciones del carrete, amplificadas por el tubo sifón, tendrán como resultado trazar sobre la banda de papel arrastrada con velocidad uniforme por los cilindros CC sobre el tambor P', una sinusoide análoga á la de la figura 991.

Aléjase algo el papel de la extremidad libre del tubo filiforme lleno de tinta, y se imprime á éste un movimiento vibratorio continuo en un plano vertical. El menisco formado por la tinta en este extremo va á ponerse de este modo en cada oscilación en contacto con la hoja de papel, la cual, por efecto de su marcha entre los cilindros que la arrastran, recibe una señal de puntos análoga á la que producía el escupidor de tinta.

La vibración del tubo se mantiene en este sistema por un método muy sencillo. Un pequeño pedazo de alambre de hierro *i* está pegado á lo largo y por debajo de la parte inferior del tubo; ese alambre experimenta la influencia del magnetismo desarrollado por medio de una corriente intermitente en un pequeñísimo electroimán que se fija, según indica la figura 990 debajo del puente-tableta P sobre que el papel se desliza. La corriente intermitente se toma de una pila especial y es enviada al electroimán E por un vibrador del género *temblador*, arreglado para que sus ocilaciones coincidan con las vibraciones propias del tubo-sifón cuya elasticidad desempeña aquí cierto papel, según se ve.

Observaciones. — 1°. Á fin de reducir la amplitud de las oscilaciones del carrete bajo la acción de las corrientes que llegan del cable, y también para sustraer éste á la influencia de las corrientes telúricas, que en ciertos casos son muy intensas, no se pone generalmente al mismo cable en contacto directo con el manantial eléctrico de la estación de salida, así como tampoco con el circuito del carrete de la estación de llegada.

2°. El flujo eléctrico se propaga desde el foco al cable y de éste al carrete receptor por mediación de un condensador.

3°. El género de aparatos más generalmente usado actualmente en los cables largos es el sifón-recórder; el galvanómetro de espejo no se usa ya sino en casos excepcionales; pero como sus señales son bastante difíciles de interpretar no se le usa sino en las líneas que no se podrían explotar por medio del aparato Morse ordinario. En efecto, en las líneas que no pasan de 500 kilómetros lo que se utiliza es el Morse ordinario; pero hay casos en que se impone el empleo de un refuerzo particular llamado de cero móvil, y entonces se usa el sistema Brown y Allan.

La velocidad media de la transmisión por cables muy largos no es sino de doce á quince palabras por minuto.

CAPÍTULO XVII

APLICACIONES INDUSTRIALES.

TELEFONÍA.

1101. **Definiciones y clasificación.** — Hemos llamado *telefonía* al conjunto de procedimientos usados para transmitir la palabra á distancia por medio de la electricidad.

Todo aparato telefónico comprende dos órganos *esenciales*, colocados, uno en la estación de partida y otro en la de llegada, y que comunican entre sí por una línea de simple alambre, ó más generalmente de dos (ida y vuelta). El primer órgano se llama el *transmisor* y el segundo el *receptor*. Aquél recibe la palabra de boca de la persona que habla y éste la comunica al oído de la que escucha.

Aunque el teléfono no fué inventado sino en 1876, existen ya infinidad de sistemas, pero pueden reducirse á dos tipos :

OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

1°. Los sistemas magnéticos;

2°. Los sistemas con pila.

En los primeros, el transmisor y el receptor son dos teléfonos; en los otros el transmisor es completamente distinto del receptor y tiene el nombre de *micrófono*. Estos últimos exigen el empleo de una pila auxiliar que no existe en los primeros.

1102. **Teléfono Bell.** — El tipo de los teléfonos es el primero que fué inventado el año 1876 por el profesor Graham Bell, de Filadelfia.

I. *Descripción.* — La figura 992 es una sección longitudinal de este aparato. La envoltura exterior consiste en un estuche de madera, M, terminado por un extremo en una pequeña caja de la misma sustancia, provista de una embocadura B. En la caja hay un carrete *b*, formado por un núcleo de hierro dulce sobre el cual se arrolla gran número de veces un alambre de cobre, cubierto de seda. Las dos entremidades van á unirse con dos alambres de cobre más gruesos

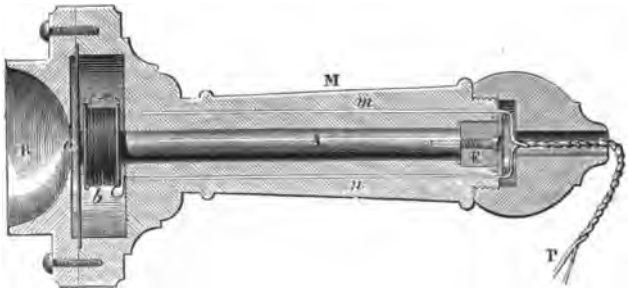


Fig. 992.

m y *n*, forrados de seda y gutapercha, y que salen torcidos uno con otro por la punta opuesta en P. Entre la embocadura y el carrete hay una placa de hierro dulce *o*, muy delgada, muy flexible, y muy cercana al núcleo del carrete, aunque no tanto que llegue á tocar con él cuando vibra. Por fin, en la otra cara del carrete hay una barra imantada A, fija por medio de un tornillo á la pieza E, que á su vez está mantenida por una pequeña placa unida á un estuche. Esta barra imanta por influencia el núcleo del carrete.

Tomando este órgano como *transmisor*, se usa otro aparato idéntico como *receptor:* aplícase la boca contra la embocadura del primero y el oído contra el del segundo. Los carretes de ambos aparatos están unidos entre sí por los dos alambres P.

II. *Funcionamiento y teoría.* — Cuando se habla en alta voz en la embocadura, las ondulaciones del aire se transmiten á la placa de hierro dulce: ésta vibra al unisono de la voz y, según la amplitud de las vibraciones, se acerca más ó menos al núcleo del carrete, imantándose y desimantándose por influencia á cada vibración. Estas variaciones de magnetismo producen en el alambre del carrete

Aléjase algo el papel de la extremid
se imprime á éste un movimiento
menisco formado por la tinta en este
oscilación en contacto con la hoja d
entre los cilindros que la arrastran, r
producía el escupidor de tinta.

La vibración del tubo se mantiene
Un pequeño pedazo de alambre de
de la parte inferior del tubo; ese
tismo desarrollado por medio de
electroimán que se fija, según m
sobre que el papel se desliza. L
especial y es enviada al electr
arreglado para que sus ocilaci
tubo-sifón cuya elasticidad des

Observaciones. — 1°. Á fin d
rrete bajo la acción de las corr
éste á la influencia de las co
intensas, no se pone general
manantial eléctrico de la es
del carrete de la estación de

2°. El flujo eléctrico se p
receptor por mediación de

3°. El género de aparatos
largos es el sifón-recórder;
excepcionales; pero como
le usa sino en las líneas q
ordinario. En efecto, en
utiliza es el Morse ordina
refuerzo particular llama
Allan.

La velocidad media de
á quince palabras por m

AP

1101. Defini
conjunto de
tancia por m

Todo apar
dos, uno e
comunica
ment

hierro dulce XX que sirve de armadura al imán y *sobrexcita* magnéticas. El carrete inducido está dividido en dos hélices

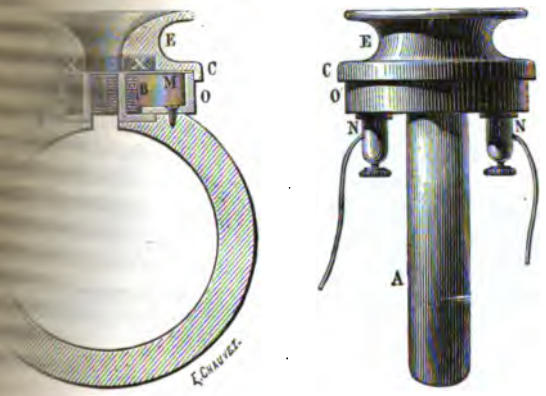


Fig. 993.

cada una en torno de un polo del imán. El diafragma vibrante es etálica colocada en frente y muy cerca de los dos polos (fig. 993). fono funciona ordinariamente como re- ro también podría ser transmisor, á la e el ordinario de Bell.

eléfono Mercadier. — Este aparato se com- dos teléfonos TT (fig. 994), muy ligeros que nos de 50 gramos, y tienen un diámetro de etros. Están reunidos por un alambre de forma de V que forma muelle y permite rlos en los oídos sin ayuda de las manos : tas quedan libres, se puede escribir á la vez telefonea. Unos embudos *t t*, llevan las ondas hasta dentro del conductor auditivo. Los ctores están en *rr*.

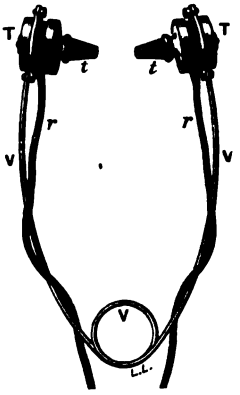


Fig. 994.

Micrófono de Hughes. — Si en un ito recorrido por una corriente (fig. 995) oloca un teléfono, y al mismo tiempo un dro de carbón que sea muy móvil sobre contactos (de carbón también), las más as vibraciones impresas al carbón mo- n la *resistencia* de los puntos de con- y en consecuencia la intensidad de la corriente lo bastante para ucir efectos telefónicos.

a disposición se realiza mediante dos carbones de retorta *u* y *o*, tados paralelamente sobre un mismo sostén, y provisto cada de ellos de una cavidad donde penetra un carbón *c* algo grueso, centímetros de largo, y bastante suelto, para poder sufrir lige- cudidas. Á fin de evitar las vibraciones in' 'ocan de la peana horizontal tubos de caucho ó 'a.

corrientes inducidas que se propagan en el circuito cerrado que va del transmisor al receptor. Estas corrientes, tanto más intensas cuanto mayores son la amplitud y la velocidad de las vibraciones, entran en el carrete del receptor y reproducen allí las variaciones de magnetismo que les dieron origen, y estas variaciones de magnetismo provocan á su vez en la placa de hierro dulce del receptor oscilaciones análogas á las del transmisor: la segunda placa se pone pues á vibrar *al unísono* de la primera; sus vibraciones se transmiten al aire, y si se aplica el oído contra la embocadura, se distinguen los sonidos que se emitieron en la embocadura del transmisor.

Por lo demás, estos sonidos se habrán debilitado más ó menos por efecto de la pérdida de fuerza viva mayor ó menor que ha ocurrido en la transmisión y transformación del movimiento molecular.

III. *Objeciones á la teoría elemental.* — Esta teoría elemental ha sido objeto de numerosas objeciones, por más que al principio se la admitió sin dificultad gracias á su sencillez.

M. Mercadier, que ha efectuado una serie de trabajos experimentales sobre la telefonía, ha probado que en un teléfono se podía reemplazar la placa de hierro por limadura del mismo metal dispuesta sobre una lámina de cartón : aquí no cabe hablar de las vibraciones unánimes de la placa. También construye teléfonos en que la placa de hierro se reemplaza por una de aluminio ó de cobre, lo cual parece indicar que la inducción magnética no es la única causa de producción de las corrientes.

Construyendo teléfonos cuya placa era incapaz de vibrar por acción de la voz humana (esto es, que tienen un sonido fundamental superior á do_2), Mercadier observó que la cualidad del efecto telefónico había aumentado, es decir, que la voz se alteraba mucho menos que en los aparatos ordinarios. Por fin, también observó que el sonido transmitido no deja de ser perceptible, no sólo cuando se suprime la placa vibrante, *sino también cuando se retira el núcleo imantado*, con tal sin embargo que las espiras del alambre no estén apretadas.

Así pues, el fenómeno es mucho más complejo de lo que á primera vista parece, y los sonidos deben atribuirse á causas múltiples :

1°. *Á las vibraciones moleculares* que resultan, en el núcleo y en la placa de las imantaciones y desimantaciones sucesivas debidas á las corrientes inducidas que llegan del *transmisor*;

2°. *Á las vibraciones de conjunto* de la placa *o, cuando es delgada*, á una y otra parte de su posición de equilibrio (según M. Mercadier, estas son nocivas para la cantidad de los efectos, útiles para su intensidad);

3°. *Á las vibraciones moleculares*, producidas en el alambre del carrete por las variaciones de estas corrientes inducidas.

IV. *Sensibilidad del teléfono Bell.* — Es posible formarse idea de la extremada sensibilidad de este aparato por la pequeñez de la corriente que basta para impresionarlo. La intensidad de la corriente producida por un teléfono Bell, para una vibración correspondiente al *la* normal, es igual á la de la corriente que daría un solo elemento Daniell en un circuito telegráfico (alambre de hierro de 4 milímetros de diámetro) que diera 290 veces vuelta á la Tierra.

V. *Aplicaciones de la sensibilidad telefónica.*— Esta gran sensibilidad del aparato se ha aplicado á revelar la existencia de corrientes sumamente pequeñas. Para ello se coloca un teléfono en el circuito por donde pasa esta corriente débil, y luego se corta el circuito en un punto cualquiera, frotando sus dos extremos uno contra otro : si por allí pasa la más ligera corriente, se oyen en el teléfono crujidos que corresponden á cada apertura ó cierre del circuito. Por ejemplo, el teléfono puede servir para apreciar el equilibrio del puente de Wheatstone.

1103. **Otros teléfonos. — Teléfono Ader.** — El receptor Ader es un teléfono magnético análogo al de Bell.

Está constituído por un imán circular A, que puede servir de mango, y pro-

visto de un anillo de hierro dulce XX que sirve de armadura al imán y *sobrexcita* en él las reacciones magnéticas. El carrete inducido está dividido en dos hélices

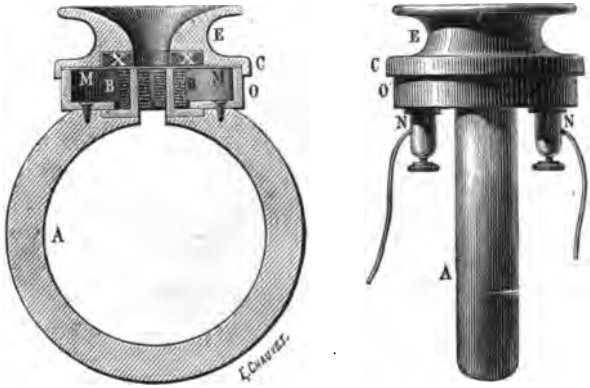


Fig. 993.

BB, arrollada cada una en torno de un polo del imán. El diafragma vibrante es una placa metálica colocada en frente y muy cerca de los dos polos (fig. 993).

Este teléfono funciona ordinariamente como receptor, pero también podría ser transmisor, á la manera que el ordinario de Bell.

1104. **Biteléfono Mercadier.** — Este aparato se compone de dos teléfonos TT (fig. 994), muy ligeros que pesan menos de 50 gramos, y tienen un diámetro de 3 centímetros. Están reunidos por un alambre de acero en forma de V que forma muelle y permite mantenerlos en los oídos sin ayuda de las manos: como éstas quedan libres, se puede escribir á la vez que se telefonea. Unos embudos *t t*, llevan las ondas sonoras hasta dentro del conductor auditivo. Los conductores están en *rr*.

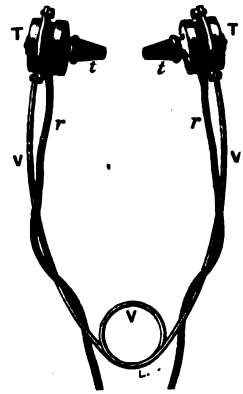


Fig. 994.

1105. **Micrófono de Hughes.** — Si en un circuito recorrido por una corriente (fig. 995) se coloca un teléfono, y al mismo tiempo un cilindro de carbón que sea muy móvil sobre sus contactos (de carbón también), las más ligeras vibraciones impresas al carbón modifican la *resistencia* de los puntos de contacto y en consecuencia la intensidad de la corriente lo bastante para producir efectos telefónicos.

Esta disposición se realiza mediante dos carbones de retorta *u* y *o*, montados paralelamente sobre un mismo sostén, y provisto cada uno de ellos de una cavidad donde penetra un carbón *c* algo grueso, de 4 centímetros de largo, y bastante suelto, para poder sufrir ligeras sacudidas. Á fin de evitar las vibraciones interiores, se colocan debajo de la peana horizontal tubos de caucho ó de algodón en rama.

El sonido más insignificante que se produce en esta peana horizontal agita el carbón *c*, hace variar la intensidad de la corriente y reproduce en el teléfono un sonido que es considerablemente

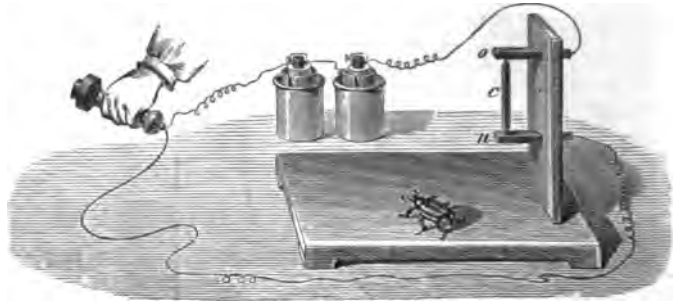


Fig. 995.

reforzado: á esto se debe el nombre de *micrófono* que se da al instrumento, por analogía con el *microscopio*. El tic-tac de un reloj, el andar de un insecto sobre la peana se distinguen con el teléfono á varios metros de distancia.

1106. **Teléfonos con pila : Transmisor microfónico.** — El órgano esencial de estos teléfonos es un *micrófono* que sirve de *transmisor*. De modo que el sistema varia según cual es el micrófono usado. Vamos á describir algunos tipos de los más usados.

Fig. 996.

1°. *Transmisor Ader.* — El transmisor Ader es un *micrófono múltiple*, constituído por doce carbones, dispuestos como una especie de parrilla doble EE (fig. 996). Se encuentra adaptado á la cara inferior de una pequeña tablita de pinsapo, que se ve por debajo en la figura 996 y por encima D en la 997, y que tiene apariencias de pupitre. Se habla encima de esta tablita, y entonces las vibraciones se comunican al micrófono, que funciona como el de Hughes.

2°. *Transmisor de Arsonval.* — Cuando los micrófonos deben servir para las grandes distancias, hay que poder graduar la presión de los carbones sobre sus puntos de apoyo, pues la sensibilidad del aparato depende de esto.

En el micrófono de Arsonval (fig. 998) se obtiene tal cosa por medio de un re-

gulador magnético : los carbones son verticales y llevan una pequeña cubierta C de hierro dulce (fig. 998, I); detrás de los carbones está un imán A sostenido

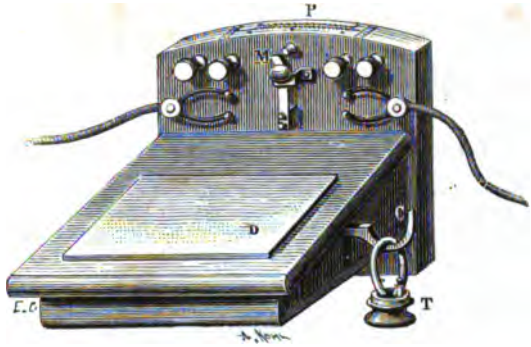


Fig. 997.

por un muelle R, que se puede acercar ó alejar por medio de un sencillo botón V ; este imán atrae los carbones y los hace adaptarse más ó menos á las cavida-

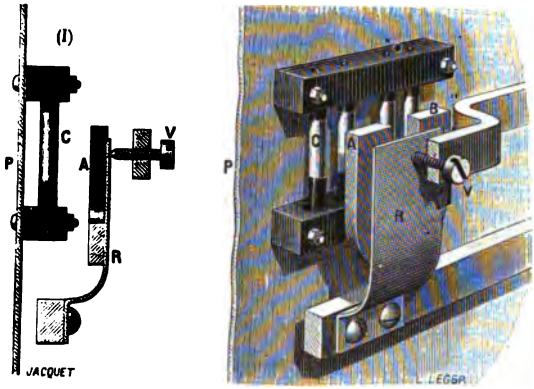


Fig. 998.

des que les sirven de sostenes. El micrófono de Arsonval tiene en general cuatro de estos sistemas (fig. 998), sometidos á la influencia de los dos polos A y B de un mismo imán simétricamente dispuesto.

3°. *Transmisor Mercadier.* — En el micrófono Mercadier, el carbón descansa en su parte inferior, por medio de una envoltura metálica, sobre una punta sostenida por una regla móvil.

Haciendo adelantar ó retroceder esta regla, se hace variar la inclinación del carbón, y por consiguiente, su presión sobre el sostén.

1107. **Perfeccionamiento de Edison : Uso del carrete de inducción.** — Cuando la línea es corta, la resistencia del micrófono constituye la mayor parte de la del circuito, y toda variación en esta resistencia produce otra de corriente bastante considerable. Pero como en las largas distancias la resistencia del micrófono no es sino pequeña fracción de la resistencia total, sus variaciones no produci-

rán sino corrientes débiles, incapaces de mover el receptor. Edison hizo dar un gran paso á la telefonía introduciendo en los micrófonos el uso del carrete de inducción.

El circuito microfónico comprende la pila, los carbones y el circuito primario de un carrete de inducción (cuya resistencia es siempre muy escasa, de 1 á 4 ohms). El circuito secundario de este carrete (150 á 200 ohms) comunica con la línea y los teléfonos receptores.

Las variaciones de intensidad de la corriente primaria producen en el circuito secundario corrientes inducidas intensas que se propagan á través de la línea y van á los receptores.

1108. **Instalación completa de un puesto telefónico.** — Cada puesto debe comprender un transmisor microfónico con su pila local, dos teléfonos receptores, y un sistema de llamada compuesto de una pila y de una campanilla.

Ha de ser posible poner en comunicación con la línea, sea el sistema de llamamiento, sea el telefónico. Esto se obtiene por medio de un conmutador automático de muelle C (fig. 996), que es dirigido por uno de los garfios de sostén de los teléfonos (el de la izquierda en los aparatos novísimos).

Cuando el aparato no funciona, como el peso del teléfono actúa sobre el garfio, el conmutador establece la comunicación de la línea con la campanilla.

Apretando un botón M (fig. 997) es posible poner en vez de la campanilla la pila de línea y mandar de este modo la corriente á la campanilla de la otra estación, situada en la otra extremidad de la línea. Cuando ésta responde, se descuelgan los teléfonos, el garfio móvil sube y el conmutador pone á la línea en comunicación con el circuito secundario del carrete de inducción y los teléfonos. Al mismo tiempo cierra el circuito primario que contiene la pila y los carbones: circuito que había permanecido abierto á fin de evitar el gasto de la pila.

1109. **Aplicaciones de los teléfonos de pila.** — 1°. *Correspondencias verbales.* — La principal aplicación de los teléfonos de pila es el establecimiento de las comunicaciones verbales entre particulares, por medio de oficinas telefónicas.

Cada suscritor tiene un puesto telefónico completo, compuesto de un *transmisor*, de dos *receptores* y de una *campanilla de aviso* un hilo de línea doble pone

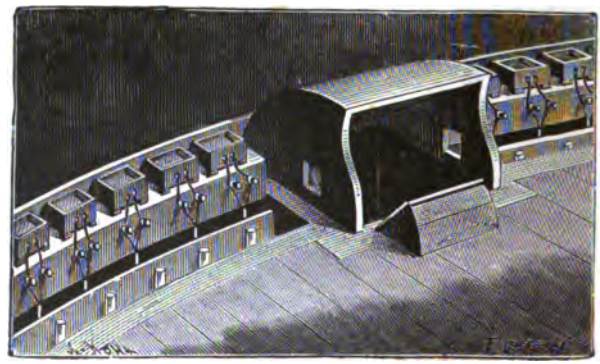


Fig. 999.

en comunicación el aparato, no con el de otro suscritor, sino con la oficina central. Cuando se desea corresponder, se aprieta el timbre de llamada, dejando en sus garfios á los receptores. De este manera se da la señal en dicha oficina, y allí hay un pequeño electroimán especial (*anunciador*) que entra en actividad y atrae una pequeña placa, la cual, cayendo con ruido seco, pone al descubierto un número correspondiente al suscritor. Entonces un empleado cuelga su receptor de las dos extremidades del hilo de línea del suscritor, empieza por devolverle un campanillazo y después le pregunta qué desea. Apenas el suscritor contesta dando el nombre y señas de la persona con quien desea hablar, el em-

pleado avisa á este último y acaba estableciendo la comunicación entre los dos suscritores por medio de un alambre que reune sus dos líneas.

2°. *Audiciones teatrales en la Exposición internacional de electricidad.* — Habíanse dispuesto en el escenario de la Ópera una docena de transmisores Ader, á lo largo de las luces y á ambos lados de la concha del apuntador (fig. 999). Unos hilos de línea subterráneos ponían á cada transmisor en comunicación con cuatro pares de receptores Ader, dispuestos á lo largo de las paredes en una sala del Palacio de la Industria, á la distancia de 2 kilómetros; el teléfono de la derecha de cada receptor estaba enlazado con un transmisor colocado á la derecha del escenario y el teléfono de la izquierda con un transmisor de la izquierda. Gracias á esta ingeniosa disposición, no sólo percibía el auditor los sonidos con sorprendente fidelidad, sino que podía seguir fácilmente con el oído los movimientos del actor, siendo más ó menos impresionado por el órgano auditivo de la izquierda ó de la derecha, según que el cantante se mantenía á la izquierda ó á la derecha del apuntador.

3°. *Teatrofono.* — De entonces acá se han simplificado y mejorado mucho las instalaciones de esta clase. Así es que esas audiciones teatrales pueden efectuarse en aparatos receptores llamados *teatrofonos*, dispuestos en los sitios públicos. Echando una moneda de 50 céntimos ó de 1 franco, se establece la comunicación eléctrica durante 5 á 10 minutos, y se produce una audición que dura el mismo tiempo.

1110. **Fotófono de Graham Bell.** — En la categoría de los teléfonos de pila se puede incluir el curioso aparato inventado por el profesor Bell, con el nombre de *fotofono.*

1°. El órgano esencial del fotofono es un *receptor de selenio*, análogo á un *locutor microfónico.*

Compónese de un pequeño cilindro de selenio fundido, dispuesto en el foco de un reflector parabólico de cobre plateado. y que forma parte del circuito de una pila local con un teléfono de Bell (fig 1000). Cada vez que un rayo luminoso, reflejado por el espejo, va á incidir sobre el selenio, *su resistencia eléctrica disminuye*, tanto más cuanto más intenso es el rayo incidente. Por consiguiente, si se hace variar esta intensidad de manera continua, la resistencia del selenio variará también y de ahí resultará en el teléfono una serie de corrientes inducidas y variaciones de magnetismo que pondrán en vibración la placa.

El *locutor* ó *transmisor* se compone

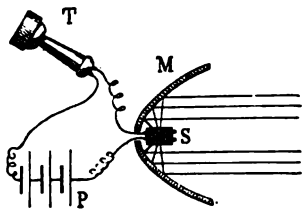


Fig. 1000.

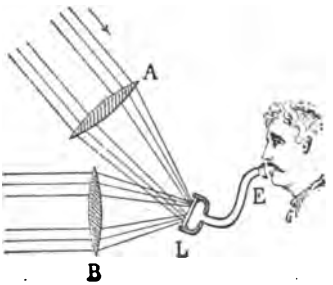


Fig. 1001.

sencillamente de una delgada lámina de vidrio ó de mica, plateada y que forma espejo, fija en el fondo de una caja telefónica L. Sobre este espejo va á incidir de manera permanente un haz convergente de luz eléctrica ó solar (fig. 1001) que después de su reflexión es devuelto por una lente B paralelamente al eje, yendo entonces á caer sobre el espejo aplanético M, que lo concentra sobre el selenio S, colocado en su foco. Mientras la placa está en reposo, el haz luminoso se transmite sin la menor variación de intensidad; pero así que se habla en la embocadura E del transmisor las vibraciones de la voz imprimen al espejo plano movimientos y cambios de forma que producen variaciones correspondientes en la intensidad del haz reflejado, de donde resulta la reproducción de los sonidos en el teléfono T.

Este aparato reproduce con mucha claridad, sea la palabra articulada, sean trozos de música; pero la distancia á que ha sido posible hasta ahora hacerlo funcionar es muy escasa, aun cuando se utiliza la luz solar, y esto por causa de la resistencia considerable del selenio (que por lo demás puede ser ventajosamente reemplazado por otros cuerpos, como el sulfuro de plata, etc.). Además, es evidente que no puede servir en el caso de que entre las dos estaciones se halle interpuesto un cuerpo opaco. Estos inconvenientes compensan con mucho la economía que resulta de la supresión de los hilos de línea. Por tal motivo, el fotofono, tan interesante en el terreno de la teoría, no ha recibido hasta hoy aplicación práctica.

METEOROLOGÍA

Y

CLIMATOLOGÍA

CAPÍTULO PRIMERO

METÉOROS.

1111. **Objeto de la meteorología.** — Se llama metéoros á los fenómenos que se producen en la atmósfera, y *meteorología* á la parte de la física que tiene por objeto el estudio de los metéoros.

Los metéoros se dividen en: 1°. *metéoros aéreos:* los vientos, los ciclones, los tornados, las trombas; 2°. *metéoros acuosos:* las nubes, las nieblas, la lluvia, el granizo; 3°. *metéoros eléctricos:* las tempestades, el rayo, las auroras boreales; y 4°. *metéoros luminosos:* el arco iris, los halos, los parhelios.

La meteorología es una aplicación de la física á los fenómenos de la atmósfera. Esa ciencia ha recibido en los últimos treinta años importantes desarrollos, y ofrece hoy al marino, al agricultor, al higienista, aplicaciones de gran interés.

METÉOROS AÉREOS.

1112. **Vientos, su causa.** — Los *vientos* son corrientes aéreas que reconocen por causa diferencias de temperatura y por consiguiente de densidad entre regiones de la atmósfera más ó menos distantes. El aire, calentándose en contacto con el suelo, se eleva lo mismo que los gases de la combustión en nuestras chimeneas, y así se produce un transporte semejante al que se ha visto formarse en los líquidos calentados por su parte inferior. De ahí corrientes ascendentes primero; después, dilatándose á medida que la presión disminuye, el aire se enfría y deja de elevarse. Las corrientes se hacen entonces horizontales y se dirigen, por las altas regiones de la atmósfera, desde las regiones calientes hacia las frías; esos son *vientos de impulsión*. Por el contrario, en las regiones bajas, el aire caliente que se eleva tira como los gases en una chimenea, por lo cual, se producen corrientes que van desde las partes frías hacia las calientes; estos son *vientos de aspiración*.

1113. **Dirección y velocidad de los vientos.** — Aunque los vientos soplan en todas direcciones, se distinguen ocho principales, que son: el *norte*, el *nordeste*, el *este*, el *sudeste*, el *sud*, el *sudoeste*, el *oeste* y el *noroeste*. Los marinos dividen además los intervalos entre esas 8 direcciones en 4, lo que hace en todo 32 direcciones, que se distinguen respectivamente por el nombre de *rumbos*. El trazado de esos 32 rumbos sobre un círculo, en forma de estrella, es denominado *rosa de los vientos*.

La dirección del viento se determina por medio de veletas; en cuanto á su velocidad, se mide por medio del *anemómetro*. Se llama así á un pequeño molino de alas que el viento hace girar; del número de vueltas dadas durante cierto tiempo se deduce la velocidad. En los climas templados la velocidad media es

de 5 á 6 metros por segundo. Con una velocidad de 2 metros, el viento es moderado; con 10 metros, fresco; con 20 fuerte; de 25 á 30 metros, tempestuoso; y de 30 á 40 metros, huracanado.

1114. **Vientos regulares ó alisios.** — Se llama *vientos regulares* á unos vientos que soplan todo el año en una dirección constante. Esos vientos, denominados también *alisios*, se observan lejos de las costas, sin interrupción, en la zona tórrida, soplando del nordeste al sudoeste en el hemisferio boreal, y del sudeste al noroeste en el austral. Reinan á los dos lados del ecuador hasta los 30 grados de latitud.

Los vientos alisios tienen por causa la aspiración permanente que se produce bajo el ecuador por efecto de la gran elevación de temperatura del aire en la superficie de los continentes y de los mares. Encima de estos últimos el aire está además saturado de vapores de agua que disminuyen su densidad. Por esta doble causa, la presión es siempre menor en las regiones ecuatoriales que en las regiones norte y sur, y de ahí, en cada hemisferio, dos corrientes de sentidos contrarios, una de aire caliente, que va del ecuador hacia el polo, ocupando las altas regiones de la atmósfera; la otra, de aire frío, dirigida desde el polo hacia el ecuador, y que ocupa las regiones inferiores, por efecto de su mayor densidad. Si la tierra estuviese immóvil, esas corrientes avanzarían en cada punto siguiendo un meridiano; pero no puede ser así á causa de la rotación de la tierra de occidente á oriente. En efecto, como la atmósfera participa de ese movimiento, á medida que la corriente salida del polo avanza en la dirección del sur, penetra en capas de aire animadas de una velocidad de rotación mayor que la suya; se dirige, pues, hacia oriente con mayor lentitud que las capas que atraviesa. En consecuencia, se inclina al oeste tanto más cuanto más se acerca al ecuador, y de ahí un viento que sopla del nordeste. En resumen, la corriente polar sopla primero del norte, luego del nordeste, y por fin del este; tal es, en ambos hemisferios, el origen de los vientos alisios.

En las altas regiones de la atmósfera se produce un fenómeno semejante, pero en sentido contrario: la corriente que parte del ecuador, va siempre al avanzar hacia el norte inclinándose al este, á causa de su mayor velocidad, y tiende á trasformarse sin cesar en viento del oeste, de sur que es al principar: este es el *alisio superior ó contra-alisio.*

En el caso de que la tierra no girara sobre su eje ó de que la elevación de temperatura fuese la misma al norte y al sur del ecuador, la figura 1002 indica la marcha de los alisios, y de los contra-alisios en los dos hemisferios. Siendo N y S los polos de la tierra, OE el ecuador, T y T' los trópicos, la capa ascendente se produce en C, en la región ecuatorial, y al llegar á las altas regiones de la atmósfera se divide en dos brazos A, A', uno hacia el norte y el otro hacia el sur, los cuales se acercan á la tierra á medida que se enfrían; estos son los contra-alisios. Por otro lado, en la parte inferior de la atmósfera; por efecto del vacío que deja la capa ascendente C, se producen dos brazos B, B', que van de las zonas templadas hacia el ecuador: estos son los alisios propiamente dichos.

La corriente ascendente que enlaza el alisio con el contra-alisio superior está perfectamente determinada en C, y no experimenta más que ligeras desviaciones hacia el norte ó hacia el sur, según las estaciones y según que se forme sobre los mares ó sobre los continentes. La corriente descendente que, en cada hemisferio, enlaza el alisio superior con el alisio inferior, no está tan bien limitada: después de haber traspasado el trópico, el contra-alisio no desciende todo entero para reunirse al alisio inferior; una parte tan sólo vuelve hacia el ecuador, mientras que la otra continúa avanzando hacia el polo hasta una latitud bastante elevada, como lo representan las líneas de puntos de la figura. Existen, pues, en realidad en cada hemisferio dos circuitos, uno entre el ecuador y el trópico, que es el *circuito directo;* el otro del trópico hacia el círculo polar, y es el *circuito derivado.* Como el circuito directo alcanza una gran altura, sus dos vientos permanecen superpuestos y no se encuentran; pero como el circuito derivado se eleva poco, sus dos vientos marchan sensiblemente al mismo nivel, en dos corrientes que se desplazan, tan pronto yuxtapuestas, tan pronto encontrándose, y dando entonces origen á las borrascas y tempestades de las zonas templadas.

La figura 1002 representa la marcha de los circuitos directos y derivados en la hipótesis de la inmovilidad de la tierra alrededor de su eje. En este caso, en efecto, los circuitos estarían todos en un mismo plano; pero como antes se ha

visto que, por efecto de la rotación de la tierra, el alisio avanza hacia el oeste y el contra-alisio hacia el este, los dos alisios no se hallan contenidos en el mismo plano y la figura anterior no es más que la proyección de sus circuitos sobre un mismo meridiano. Además se ha supuesto que la distribución del calor es simétricamente la misma á los dos lados del ecuador, y en ese caso, la capa ascen-

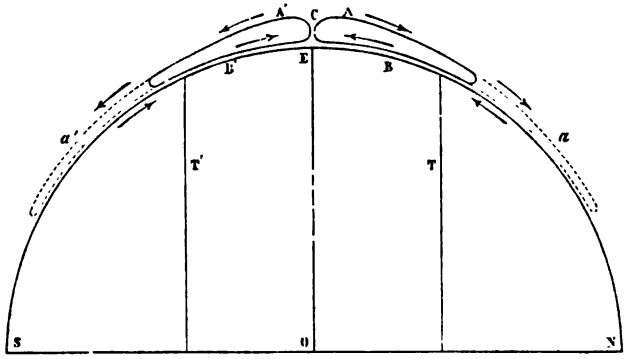


Fig. 1002.

dente representada en C se encontraría exactamente encima del ecuador. Pero el hemisferio norte es más caliente que el hemisferio sur; de donde resulta que esta capa se desplaza hacia el norte del ecuador. Experimentando el mismo movimiento los circuitos directos y derivados, los alisios A y B se extienden más allá del trópico norte, mientras que los alisios A' y B' no llegan al trópico sur. En realidad, en la figura anterior, los diferentes circuitos deben, pues, ser llevados algo hacia el norte.

1115. **Región de las calmas.** — Los alisios de los dos hemisferios, aunque convergen hacia el ecuador, no producen en éste más que un viento muy ligero. En efecto, como su dirección se hace entonces vertical, su resultante horizontal tiende á ser nula; de ahí las calmas á que se da el nombre de *calmas ecuatoriales*, turbadas sin embargo por tempestades casi diarias.

La región de las calmas es variable : en el norte de África, por encima del Sahara, llega hasta los 20 grados de latitud norte; sobre el Atlántico á los 10°. En el Pacífico, la región de las calmas se separa poco del ecuador. Sus variaciones son más grandes en verano que en invierno, y, en general, presenta las mismas sinuosidades que las curvas de máxima temperatura.

Cuando los contra-alisios descienden hacia la tierra, en la extremidad de su carrera, su inclinación en el sentido de la vertical produce un efecto análogo al que produce en el ecuador la capa ascendente, es decir, que se observa también una región de las calmas, pero menos bien caracterizada que la primera, son las *calmas tropicales*.

Hay, pues, que considerar, á partir del ecuador : 1°. la región de las calmas ecuatoriales, 2°. la de los alisios; 3°. la de las calmas tropicales; y 4°. la región de los vientos variables (1117).

1116. **Vientos periódicos, monzones, simún, brisa.** — Los *vientos periódicos* son unos vientos que soplan regularmente en una dirección, en las mismas estaciones ó en las mismas horas del día ; tales son el monzón, el simún y la brisa.

Se llama *monzones* á unos vientos que soplan seis meses en una dirección y seis meses en la otra. Se les observa principalmente en el mar y golfo de Arabia, en el golfo de Bengala y en el mar de China. Durante el estío se dirigen hacia los continentes, y en el invierno soplan en sentido contrario.

Los monzones del verano reconocen por causa la alta temperatura que alcanza en la primera estación la vertiente meridional de los montes Himalaya. Una capa de aire caliente se eleva á lo largo de esa vertiente, y, dando origen á una poderosa aspiración de los alisios del sudeste, los transforma en monzones, de la

mar hacia el continente. Durante el invierno, por el contrario, como el continente se enfría más que el mar, la aspiración se produce encima del Océano Índico, y los monzones soplan en dirección opuesta á la primera. Todas las grandes cadenas de montañas producen efectos semejantes.

El *simún* es un viento ardiente que sopla de los desiertos de Asia y de África, y que está caracterizado por su alta temperatura y por las arenas que eleva en la atmósfera y que transporta consigo. Cuando ese viento sopla, el aire se oscurece, la piel se seca, la respiración se acelera y la sed se hace inextinguible.

Este viento es llamado *sirocco* en Italia y *simún* en Argel, donde sopla viniendo del Sahara. En Egipto lleva el nombre de *kramsín*, y se le observa desde fines de Abril hasta Junio. Para preservarse de los efectos de una transpiración cutánea demasiado rápida ocasionada por este viento, los indígenas de África se untan el cuerpo con grasa.

La *brisa* es un viento que sopla sobre las costas, desde el mar hacia la tierra durante el día, y de la tierra hacia el mar durante la noche, es decir, desde la región más fría hacia la región más caliente. En efecto, en las horas del día el suelo se calienta más que el mar, por lo que el aire se dilata más sobre la tierra que sobre las aguas, sube y es reemplazado por una corriente de aire más denso que viene desde el mar en dirección de la tierra. Pero por la noche el suelo se enfría más que el agua del mar, á causa de la radiación, y el mismo fenómeno se produce en sentido contrario. La brisa marina empieza después del nacimiento del sol, aumenta hasta las tres de la tarde, decrece hasta anochecer, y se cambia en brisa de tierra después que el sol se pone. Las brisas terrestres y marinas sólo se dejan sentir á escasa distancia de las costas. Las brisas, regulares entre los trópicos, lo son menos en las zonas templadas, y apenas se las percibe en las costas de Groenlandia. La proximidad de las montañas da también origen á brisas periódicas.

1117. **Vientos variables.** — Los *vientos variables* son unos vientos que soplan tan pronto en una dirección como en otra, sin que se pueda indicar ninguna ley que presida á su dirección. En las latitudes medias, la dirección de los vientos es muy variable; avanzando hacia los polos, esta irregularidad aumenta, y bajo la zona glacial los vientos soplan á veces de varios puntos del horizonte al mismo

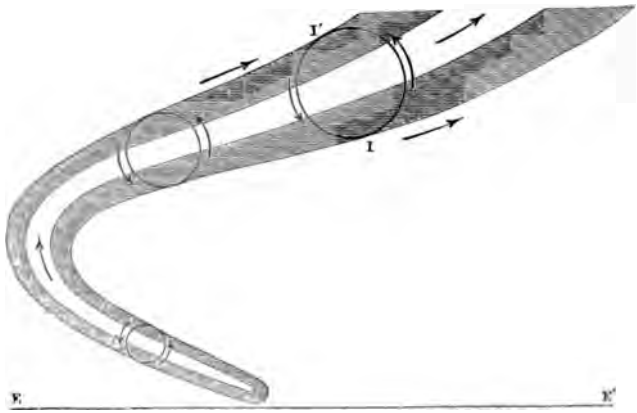


Fig. 1003.

tiempo. Á medida que nos acercamos á la zona tórrida, se van haciendo más regulares. El viento del sudoeste es el que domina en el norte de Francia, en Inglaterra y en Alemania; en el medodía de Francia, la dirección de las corrientes atmosféricas se inclina más hacia el norte; en España y en Italia, predomina el viento norte.

1118. **Ciclones.** — Se llama así á unas masas considerables de aire animadas de

un movimiento giratorio muy rápido alrededor de un eje vertical. Estos metéoros se originan en la región de las calmas ecuatoriales, donde tienen siempre por causa una desigual velocidad en los alisios que convergen uno hacia otro, viniendo de los dos hemisferios.

Los ciclones no están solamente animados de un movimiento giratorio, sino también de uno de traslación, en virtud del cual se dirigen á veces hacia las zonas templadas. La velocidad del movimiento de rotación alcanza su máximum á una distancia media del centro del ciclón, y se eleva entonces hasta 250 kilómetros por hora. El de traslación que crece con la distancia al ecuador, se halla comprendido en los límites de 15 á 45 kilómetros por hora.

En el hemisferio austral, la rotación se opera siempre de oeste á este pasando por el norte. En el hemisferio boreal, la rotación es de sentido contrario. En cuanto á la traslación, se verifica primeramente en los dos hemisferios de este á oeste; luego se inclina hacia el este.

Representando al ecuador por la línea EE', la figura 1003 indica la marcha y el desarrollo de un ciclón en el hemisferio boreal. El diámetro inicial, que es al principio de 250 á 400 kilómetros, crece progresivamente, y alcanza, en las latitudes elevadas, hasta 2000 kilómetros. En el centro se halla una región constantemente en calma; de las dos regiones laterales, la marcada en I, donde las dos velocidades de rotación se suman, es el *borde peligroso*, mientras que, en I', en que las velocidades son opuestas, se encuentra el *borde manejable*. Los ciclones vienen acompañados de una baja constante del barómetro, sobre todo en el centro, lo que es efecto de la fuerza centrífuga engendrada por el movimiento giratorio.

Estos temibles fenómenos, que son por fortuna poco frecuentes, se observan sobre todo en los mares de China y de las Indias, donde se les conoce con el nombre de *tifones*, y también en las Antillas.

1119. **Tornados.** — Los *tornados* son unas ráfagas violentas que se producen en la región de las calmas ecuatoriales, donde acompañan, en general, á las tempes-

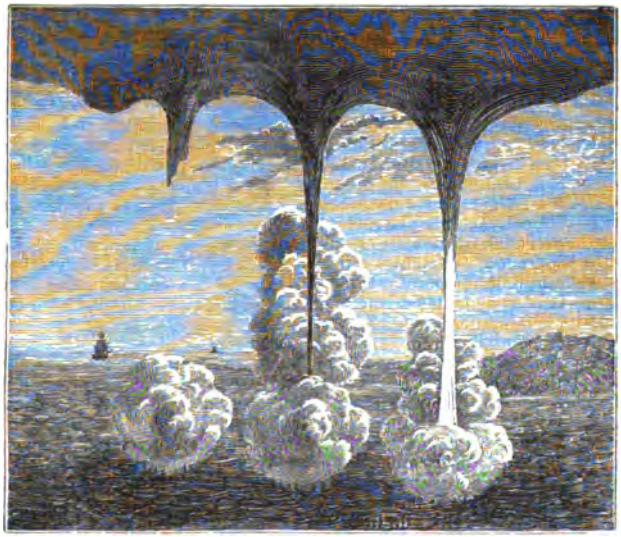


Fig. 1004.

tades tan frecuentes en esa zona. Esos metéoros se hallan, como los ciclones, animados de un movimiento giratorio debido á la desigual velocidad de los ali-

sios. Los tornados se anuncian por una pequeña nube blanca que se aparece á gran altura. Esta nube crece, baja lentamente, y al acercarse á la tierra se rodea de una masa sombría, que oscurece rápidamente toda la atmósfera. Por fin, del punto más negro en medio de los resplandores del rayo, se lanza con una extrema violencia el torbellino que constituye el tornado.

1120. **Trombas.** — Las *trombas* consisten en acumulaciones de vapores, suspendidos en las capas inferiores de la atmósfera, que atraviesan, animados en general de un movimiento giratorio bastante rápido para arrancar los árboles, derribar las casas, romper y destruir todo lo que encuentran ante su paso.

Estos metéores, que casi siempre se presentan acompañados de lluvia y granizo, despiden á menudo rel mpagos y rayos, produciendo en toda la zona que recorren, el ruido de una carreta que marcha sobre un camino cubierto de piedras. Gran número de trombas carecen de movimiento giratorio, y la cuarta parte de las que se observan, se originan en una atmósfera tranquila.

Las trombas se manifiestan lo mismo sobre los mares que sobre los continentes, y entonces el fenómeno toma un aspecto notable. Las aguas se agitan y se elevan en forma de cono, mientras que las nubes descienden á su vez en forma de cono invertido, que forma con el primero, al reunirse ambos por sus vértices, una columna continua desde la mar hasta las nubes (fig. 1004). Sin embargo, aun en plena mar el agua de las trombas no es nunca salada, lo que prueba que esos metéoros están sobre todo formados por vapores condensados, y no por el agua de mar, elevada por aspiración.

Las trombas duran muy poco, pues el camino que recorren es sólo de unos cuantos kilómetros. En cuanto á su extensión ó anchura, se han observado algunas cuyo diámetro no pasaba de 200 metros. Sin embargo, á menudo adquieren una violencia tal, que derriban las casas, arrancan los árboles más gruesos y los arrastran por espacios de más de 100 metros.

Kœnitz admite que esos fenómenos se deben á dos vientos opuestos que pasan uno al lado del otro, ó bien á un viento muy vivo que reina en las altas regiones de la atmósfera. Peltier les ha atribuido un origen eléctrico, opinión que es la generalmente admitida en la actualidad.

METÉOROS ACUOSOS.

1121. **Nubes.** — Las *nubes* son unas masas de vapores condensados en forma de gotas de extremada pequeñez, á una altura más ó menos grande en la atmósfera. Esos fenómenos resultan siempre de la condensación de los vapores que se elevan de la tierra. Según las apariencias que presentan, se divide á las nubes en cuatro especies principales, que son los *cirrus*, los *cúmulus*, los *stratus* y los *nimbus*. Estas cuatro especies de nubes están representadas en la figura 1005, y designadas respectivamente por 4, 3, 2 y 1 aves que vuelan.

Los *cirrus* son unas pequeñas nubes blanquecinas, que presentan el aspecto de filamentos separados, semejantes á los de la lana cardada. Son las nubes más altas, y, vista la baja temperatura de las regiones que ocupan, se las considera como formadas de partículas de hielo ó de copos de nieve. Su aparición precede á menudo un cambio de tiempo.

Los *cúmulus* son nubes redondeadas, que presentan el aspecto de montañas puestas unas sobre otras. Son más frecuentes en verano que en invierno, y, después de haberse formado por la mañana, se disipan generalmente por la noche. Si á esta hora son, por el contrario, más numerosas, y sobre todo si encima de ellas se observan cirrus, hay que temer lluvia ó tormentas.

Los *stratus* son unas capas nebulosas horizontales, que ocupan las regiones inferiores de la atmósfera, y que parecen muy estrechas por un efecto de perspectiva. Se forman al ponerse el sol y desaparecen al salir este astro; frecuentes en otoño, son raras en la primavera.

Por fin, los *nimbus*, ó nubes de lluvia son nubes que no afectan ninguna forma característica; se distinguen sólo por su color oscuro uniforme, y por las franjas que ostentan en sus bordes.

La altura de las nubes es muy variable; por término medio varía entre 1200 y 1400 metros en invierno, y entre 3000 y 4000 en verano. Pero con frecuencia es mucho mayor. Gay-Lussac, en su ascensión aerostática, en Julio, á una altura de

7016 metros sobre el nivel del mar, observó por encima de su globo cirrus que parecían estar á una altura considerable. M. d'Abbadie ha visto, en Etiopia, nubes tempestuosas que se hallaban apenas á 212 metros del suelo.

Para explicar la suspensión de las nubes en la atmósfera, se admite con Saussure, que las nubes y las nieblas están formadas de gotecitas de agua en extremo pequeñas, macizas y que flotan en la atmósfera, donde se encuentran sostenidas por las corrientes de aire caliente ascendente, á la manera que los vientos levantan el polvo. En cuanto á la inmovilidad que presentan las nubes en el sentido

Fig. 1005.

de la vertical, sólo es aparente, en sentir de estos físicos. Á menudo las nubes bajan poco á poco; pero entonces su parte inferior se disipa continuamente en las capas más calientes que atraviesa, mientras que su parte superior aumenta sin cesar, por la adición de nuevos vapores que se condensan: así se explica por qué parecen conservar una altura constante.

1122. **Formación de las nubes.** — Varias causas contribuyen á la formación de las nubes: 1°. la baja temperatura de las altas regiones de la atmósfera. En efecto, de la tierra y de las aguas se desprenden constantemente, bajo la influencia del sol, vapores que se elevan en el aire en virtud de su menor densidad; estos vapores, encontrando capas de aire cada vez más frías, descienden pronto á la temperatura de saturación y entonces es cuando, condensándose en gotecillas infinitamente pequeñas, dan origen á las nubes.

2°. Las corrientes de aire caliente y húmedo, que se elevan durante el día en la atmósfera, experimentan una presión cada vez más débil, de lo cual resulta una dilatación que es un manantial de frío intenso, y que produce la condensación de los vapores. Por estas razones es por lo que las altas montañas, deteniendo las corrientes aéreas y obligándolas á elevarse, son una causa abundante de lluvia.

3°. Una corriente de aire caliente y húmedo que se mezcla con un aire más frío, experimenta un enfriamiento que da también origen á una condensación de vapores. Así es como los vientos calientes y húmedos del sur y del sudoeste, al mezclarse con el aire más frío de nuestras latitudes producen la lluvia. Los vientos del norte y del nordeste, que son fríos, tienden también, mezclándose á nuestra atmósfera, á condensar sus vapores; pero como, por efecto mismo de su

baja temperatura estos vientos son muy secos, la mezcla resultante alcanza raras veces la saturación, y generalmente no dan lluvia.

1123. **Lluvia. — Pluviómetro.** — La *lluvia* es la caida, en estado de gotecillas, del agua que proviene de la condensación en las altas regiones de la atmósfera, de los vapores que se elevan del suelo. En general, las nubes que se ven en el aire no son las que dan la lluvia; sino que ésta se produce en el momento mismo de la condensación de los vapores y las gotas son tanto más grandes cuanto de mayor altura caen.

Se mide la cantidad de lluvia que cae anualmente en un lugar por medio del *pluviómetro* ó *udómetro*. Este aparato consiste en un vaso cilíndrico M (fig. 1006 y 1007), cerrado en su parte superior por una tapadera B, que tiene la forma de un embudo, en el cual cae el agua de lluvia. Esta penetra en seguida en el vaso por un pequeño agujero, lo cual la sustrae todo lo posible á la evaporación. De la parte inferior parte un tubo de vidrio A en el que el agua se eleva á la misma altura que en el interior, altura que se lee en una gran escala graduada en milímetros, que se dispone al lado del tubo. Si se coloca el aparato en un sitio descubierto, y si, al cabo de un mes, por ejemplo, la altura del agua en el tubo es de $0^m.05$, esto indica que el agua en el vaso se ha elevado hasta el mismo nivel, y, por consiguiente, que si el líquido vertido por las nubes estuviese extendido sobre el suelo, sin evaporación ni filtración, se habría formado una capa del mismo de $0^m,05$.

Fig. 1006.

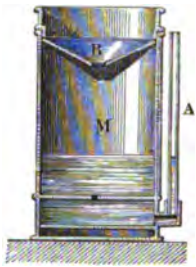


Fig. 1007.

Gran número de circunstancias locales pueden hacer variar la cantidad de agua que cae en diversos países; pero, supuestas iguales todas las condiciones, en los países calientes es donde más debe llover porque la evaporación es más abundante en ellos. Se observa en efecto que la cantidad de lluvia crece de los polos al ecuador. En París, la altura del agua que cae durante el año es de $0^m,564$; en Burdeos, de $0^m,650$: en la Madera, de $0^m,767$; en la Habana, de $2^m,32$; en Santo Domingo, de $2^m,73$.

La cantidad de lluvia varía con las estaciones. En París, en invierno, la altura del agua que cae es de $0^m,107$; en la primavera, de $0^m,174$; en verano, de $0^m,161$; en otoño, de $0^m,122$. En invierno es, pues, cuando menos llueve.

1124. **Nieblas.** — Las *nieblas* son masas de vapor de agua que, condensadas en la atmósfera, ocupan las regiones bajas de la misma y turban su transparencia. Las nieblas son verdaderas nubes, que se forman en la superficie del suelo por el enfriamiento de las capas inferiores de la atmósfera. Las *brumas* son nieblas muy espesas.

1125. **Rocío, sereno, escarcha.** — El *rocío* no es más que vapor de agua que se condensa y se deposita en forma de gotas sobre los cuerpos durante la noche. Este fenómeno se debe al enfriamiento que experimentan por efecto de la radiación nocturna los cuerpos colocados en la superficie del suelo. Como su temperatura baja entonces varios grados respecto de la del aire, sucede, sobre todo en las estaciones calientes, que esa temperatura llega á ser inferior á la en que la atmósfera quedaría saturada. Entonces es cuando las capas de aire que se hallan en contacto con los cuerpos, y sensiblemente á la misma temperatura que éstos, depositan una parte del vapor que contienen; fenómeno análogo al que se produce cuando se lleva á una habitación húmeda y caliente una botella de agua fresca: los vapores del agua se condensan sobre sus paredes.

Con arreglo á esta teoría que se debe al físico inglés Wells, todas las causas que favorecen el enfriamiento de los cuerpos deben aumentar también el depósito de rocío: esto es lo que la experiencia demuestra. Esas causas son: el poder emisivo de los cuerpos, el estado del cielo y la agitación del aire. Los cuerpos

que tienen un gran poder emisivo, deben condensar más vapor, puesto que se enfrian más. En efecto, el depósito de rocío es generalmente nulo sobre los metales cuyo poder emisivo es escaso, sobre todo si están pulimentados; mientras que la tierra, la arena, el vidrio, las plantas, que tienen un gran poder emisivo, se cubren abundantemente de rocío.

El estado del cielo ejerce también una gran influencia sobre ese fenómeno. Si la atmósfera está pura, sin nubes, los espacios planetarios, que se encuentran á una temperatura muy baja, sólo envían á la tierra una cantidad de calor inapreciable, y como el suelo se enfría entonces rápidamente por la radiación nocturna, hay un abundante depósito de rocío. Pero si hay nubes, éstas, cuya temperatura es mucho más elevada que la de los espacios planetarios, envían su calor hasta el suelo y, en consecuencia, los cuerpos de la superficie de la tierra experimentan sólo un débil enfriamiento, por lo cual no se efectúa depósito de rocío.

El viento ejerce también influencia en la cantidad de vapor que se deposita. Si es débil la aumenta renovando el aire; pero si es fuerte, la disminuye calentando los cuerpos por su contacto, y no dejando el aire el tiempo de enfriarse. Por último, el depósito de rocío es tanto más abundante, cuanto más húmedo está el aire, pues éste se halla así más cerca de su punto de saturación.

El *sereno* es una precipitación de agua en forma de lluvia muy fina, sin que se observe ninguna nube. Este fenómeno se produce durante los grandes calores, en los lugares húmedos, al ponerse el sol, cuando las capas inferiores de la atmósfera se enfrían por debajo del punto de saturación.

La *escarcha* ó *helada* resulta, como el rocío, de los vapores contenidos en la atmósfera, cuando esos vapores se condensan sobre cuerpos cuya temperatura es inferior á cero. La forma de copos que presentan los pequeños cristales de que la escarcha está formada, indica que aquí los vapores se condensan inmediatamente sin pasar por el estado líquido. La escarcha se deposita, lo mismo que el rocío, sobre los cuerpos que emiten más calor, tales como las ramas y hojas de los árboles, y el depósito se efectúa principalmente sobre las partes vueltas hacia el cielo.

1126. **Nieve, granizo helado, verglas.** — La *nieve* es agua solidificada en pequeños cristales de forma de estrellas, diversamente ramificados y que flotan en la atmósfera. Estos cristales proceden de la congelación de las gotecillas que forman las nubes, cuando su temperatura desciende por debajo de cero. Son tanto más regulares cuanto más tranquilo se halla el aire en que se forman. Para observar-

Fig. 1008.

os, se les recoge encima de un cuerpo negro y se les mira con una lente de mucho aumento. La regularidad y al mismo tiempo la variedad de sus formas son verdaderamente admirables. La figura 1008 hace ver algunas de las formas que presentan los cristales de nieve, cuando se les observa con el microscopio. Sus variedades ascienden á varias centenas.

En un lugar cualquiera nieva tanto más cuanto más cerca de los polos se halla, ó cuanto más elevado se encuentra por encima del nivel del mar. Hacia los polos, la tierra está constantemente cubierta de nieve; otro tanto ocurre sobre las altas montañas, donde reinan las nieves perpetuas, aun bajo el ecuador.

El *granizo helado* (*gresil* en francés), que es también agua solidificada, está constituído por pequeñas agujas de hielo agrupadas unas contra otras de una manera confusa. Se atribuye su formación á la congelación brusca de las gotecillas de las nubes en un aire agitado.

El *verglas* es una capa de hielo unida y transparente que se deposita sobre el suelo. La condición necesaria para que ese fenómeno se realice es que, siendo inferior á cero la temperatura de la tierra, después de varios días de frío continuo, venga á caer un poco de lluvia: ésta se congela en seguida; pero si continúa lloviendo, el suelo se calienta y el verglas no se forma.

1127. **Granizo.** — El *granizo* es un conjunto de glóbulos de hielo compactos, más ó menos voluminosos, que caen de la atmósfera. En los climas templados el granizo se observa principalmente durante la primavera y el verano, y durante las horas de mayor temperatura del día: de noche casi nunca cae. La caída del granizo viene siempre precedida por un ruido particular.

El granizo es generalmente el precursor de las tempestades: es raro que las acompañe, y más raro aún que las siga. El grueso de los granizos es muy variable, alcanzando á veces el de una avellana. Se han visto algunos tan grandes como un huevo de paloma y pesando 200 á 300 gramos. Ninguna teoría explica de una manera satisfactoria la formación de los granizos, y sobre todo cómo pueden alcanzar semejante peso antes de caer. En la teoría de Volta, los granizos son atraídos sucesivamente por dos nubes cargadas de electricidades contrarias; pero si tal cosa sucediera, con mayor razón deberían las nubes atraerse entre sí y confundirse en una sola.

Saussure admitía que los granizos empiezan á formarse en las altas regiones de la atmósfera, y aumentan de volumen al caer. De la Rive pensaba que el granizo proviene de gotas de agua que se enfrían por debajo de cero y que se solidifican bruscamente. M. Dufour admite también que los granizos son el resultado de la congelación súbita de glóbulos de agua en la región de las nubes, donde han conservado el estado líquido á una temperatura inferior á cero. Si algunos glóbulos se solidifican, desde que chocan con otros líquidos todavía, éstos pasan instantáneamente al estado sólido, según se ha visto al tratar de la sobrefusión: los nuevos glóbulos se adhieren á los otros y así llegan los granizos á adquirir el volumen que á veces presentan.

METÉOROS ELÉCTRICOS.

1128. **Descubrimiento de la electricidad de la atmósfera por Franklin.** — Desde que la chispa eléctrica fué conocida, se la comparó al resplandor del relámpago, y el chasquido que la acompaña al ruido del trueno; pero Franklin fué el primero que, con ayuda de las baterías eléctricas, estableció un paralelo completo entre el rayo y la electricidad, indicando en una memoria publicada en 1749 las experiencias que había que practicar para extraer de las nubes tempestuosas su fluído por medio de puntas metálicas.

Experiencia de Dalibard. — Guiado por las ideas teóricas de Franklin, Dalibard, físico francés, dispuso en un jardín, en Marly, cerca de París, una barra de hierro aislada, de 33 metros de altura, la cual bajo la influencia de una nube tempestuosa dió, el 19 de Mayo de 1752, chispas eléctricas bastante fuertes para cargar algunas botellas de Leiden.

Experiencia de Franklin. — Sin embargo, Franklin se disponía por su parte á efectuar la experiencia que había anunciado; para ello esperaba á que se terminara un campanario que estaba un construcción, cuando tuvo la idea de emplear una cometa provista de una punta metálica, que podía subir á las más elevadas regiones en la atmósfera. En junio de 1752, en un día tempestuoso, y antes de conocer la experiencia de Dalibard, se dirigió Franklin á un campo, cerca de Filadelfia, en compañía de su hijo. Allí echó á vuelo la cometa, atando una llave á la cuerda, y á la llave un cordón de seda destinado á aislar el aparato. Luego ató en un árbol el cordón de seda. Presentó la mano ante la llave

y no sacó por de pronto ninguna chispa, lo que le hizo casi desesperar del éxito, cuando vino á caer una ligera lluvia que humedeciendo la cuerda la volvió buena conductora, y la llave dió la chispa deseada. La emoción del célebre físico fué tan viva, según él mismo lo cuenta en sus cartas, que no pudo contener sus lágrimas.

Franklin, que había descubierto el poder de las puntas, pero que ignoraba la teoría, admitió que la cometa robaba á la nube su electricidad, pero con arreglo á la teoría de la electrización por influencia, el fenómeno debe explicarse por la acción que la nube tempestuosa ejercía sobre la cometa y sobre la cuerda.

1129. **Aparatos para apreciar la electricidad de la atmósfera.** — Los primeros aparatos empleados para reconocer la presencia de la electricidad en la atmósfera fueron : el electrómetro de bolas de saúco, de pajuelas ó de hojas de oro, el aparato de Dalibard, flechas lanzadas al aire y aun cometas y globos cautivos.

Los aparatos usados actualmente son :

1°. El electrómetro de Saussure;

2°. El colector de electricidad de Thomson ;

3°. El electrómetro bifiliar de Palmieri.

1130. **Electrómetro de Saussure.** — Para observar la electricidad durante un tiempo sereno, en que la tensión es generalmente escasa, se usa con preferencia el electrómetro que Saussure aplicó á este género de trabajos. Es un electrómetro semejante al ya descrito, pero en el que el vástago que sostiene las hojas de oro ó las pajas está coronado por un conductor de 60 centímetros de altura, terminado en bola ó en punta (fig. 1009). Para preservar de la lluvia el aparato, se le cubre con un bonete metálico de un decímetro de diámetro. La urna de vidrio, que es cuadrada, no tiene más que 5 centímetros de lado, y en la cara interna se adapta un cuadrante graduado que indica el ángulo de separación de

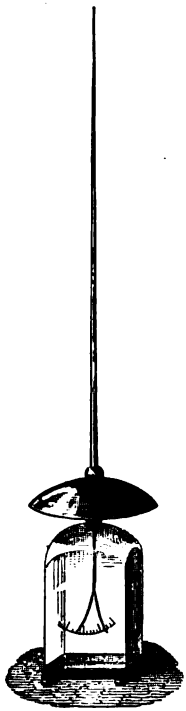


Fig. 1009.

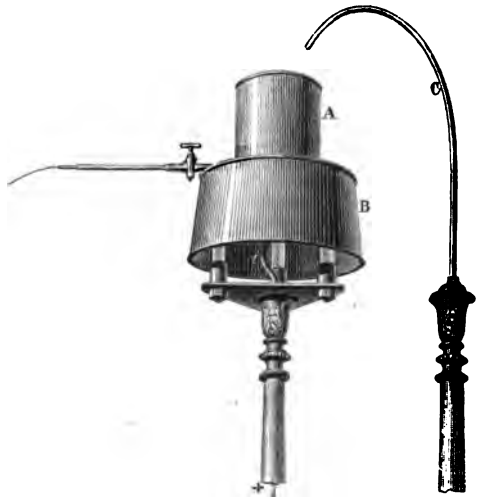


Fig. 1010.

las hojas de oro ó de las pajas. Este electrómetro no indica la existencia de electricidad atmosférica sino en tanto que se sube en la atmósfera, de modo que llegue á encontrarse en corrientes de aire cuyo estado eléctrico sea superior al suyo. Una elevación de 3 decímetros basta para obtener una divergencia de

20 grados por efecto del exceso de electricidad. Según Saussure, hasta 25 grados las desviaciones son proporcionales á las cargas eléctricas.

1131. **Colector de la electricidad atmosférica de Thomson.** — Al tratar de los aparatos que sirven para probar la presencia de la electricidad en la atmósfera, como los electrómetros de Saussure, Palmieri y Pelletier, ó las flechas de Becquerel, se ha visto que ninguno da signos de electricidad si no se le eleva en la atmósfera. El mismo resultado se obtiene con el *colector de electricidad* de Thomson por medio de la salida de un hilito de agua.

Este aparato consiste en un vaso metálico A de 60 litros de capacidad, aislado sobre tres tubos de vidrio macizos ó de ebonita, fijos en lo alto de una columna hueca de fundición y que tiene dos metros de altura (fig. 1010). El conjunto se pone al descubierto, protegiéndose los tubos contra la lluvia por medio de una tapa de latón B. El vaso A se llena de agua por medio de un tubo lateral C que comunica con un depósito más elevado; después se hace salir el agua del vaso por un conducto de llave fijo en la base.

Sea V el potencial del aire en las cercanías del orificio de este conducto. Si el potencial del agua contenida en A es diferente, é igual pongamos por ejemplo á V', resultará de aquí una fuerza eléctrica normal á la superficie del agua que sale y cuyo signo dependerá del signo de $V - V'$; si se tiene $V' < V$, la fuerza se dirigirá hacia el interior del agua; por consiguiente, la densidad eléctrica en la superficie del agua estará dada por la fórmula de Coulomb

$$F = -4\pi\mu.$$

Como cada gotecilla arrastra consigo de esta manera electricidad negativa, la carga positiva del agua aumenta en A de manera continua y por consiguiente el potencial de este agua crece hasta el momento en que se tiene $V' = V$.

De ahí resulta que como el electrómetro que se encuentra en comunicación permanente con el vaso A mide el potencial de este vaso, también mide el del aire en el orificio de salida. El electrómetro usado en el Observatorio de Montsouris es el de M. Branly, ya descrito.

1132. **Electrómetro bifiliar de Palmieri.** — Finalmente, para observar la electricidad de la atmósfera y medir su tensión, M. Palmieri, director del Observatorio del Vesubio, adoptó un electrómetro bifiliar que comunica con la atmósfera por un largo conductor móvil, y que por este medio se eleva más ó menos sobre el sitio de la observación.

1133. **Distribución de la electricidad en la atmósfera y en las nubes.** — Después de observaciones continuadas durante muchos años, y con ayuda del electrómetro de conductor móvil, M. Palmieri ha llegado á obtener los resultados siguientes, que difieren en varios puntos de los admitidos hasta hoy por los meteorologistas.

1°. En un cielo sereno como en un cielo nebuloso, la electricidad de la atmósfera es siempre positiva, siempre que á cierta distancia del lugar de observación no caiga lluvia, ni granizo, ni nieve. Esta distancia varía con la abundancia de la lluvia, de la nieve ó del granizo, y su máximum es de 50 á 60 kilómetros. Según M. Palmieri, si se observa electricidad negativa en la atmósfera cuando el cielo está cubierto, no hay que atribuirla á nubes negativas, sino á que en las regiones cercanas llueve, nieva ó graniza. Durante veinte años de observaciones, á una altura de 637 metros, cuando pasaban nubes por encima del Observatorio del Vesubio, envolviéndolo durante días enteros, se ha observado constantemente en esas nubes electricidad positiva.

2°. La electricidad de la atmósfera aumenta á medida que crece la humedad relativa, y alcanza su máximum al caer la lluvia, la nieve ó el granizo, no solamente en el lugar de la observación, sino hasta la distancia de 60 kilómetros; y entonces es cuando se pueden sacar chispas de los conductores aislados y bien expuestos.

3°. Las nubes solas no tienen por sí mismas una tensión propia respecto del medio ambiente; y en las nubes ó á una pequeña distancia de éstas, no se observan tensiones bastante fuertes más que mientras los vapores se condensan en nubes para producir la lluvia á alguna distancia del lugar de observación. En efecto, nunca se obtiene una descarga luminosa sin que caiga la lluvia, la nieve ó el granizo en el punto en que se verifican las observaciones, ó á cierta distancia del mismo

4°. La ley con arreglo á que se manifiesta la electricidad durante las lluvias tranquilas ó tempestuosas, puede ser enunciada de este modo. *En el punto en que llueve existe una fuerte manifestación de electricidad positiva, rodeada de una zona de electricidad negativa, que á su vez está seguida de otra zona de electricidad positiva*, hallándose el límite entre las dos zonas á la tensión cero. Por consiguiente, se pueden observar fuertes tensiones positivas ó negativas, según la posición que se ocupe respecto de la lluvia; y se pasa de una fase á otra, si la lluvia empezando á caer á cierta distancia, se acerca al lugar de observación, cae en él y se aleja en seguida. De ahí deduce M. Palmieri que las nubes no son conductores electrizados sino una especie de electricidad positiva mientras se resuelven en lluvia; de manera que su fuerte tensión positiva es lo que, por influencia excita en los alrededores la producción de electricidad negativa. En una palabra no hay nubes que posean una electricidad propia, y si á veces sucede que, durante la lluvia, se tiene electricidad negativa en el punto de la observación, eso se debe á otra lluvia mucho más fuerte que cae á distancia.

5°. Por fin, M. Palmieri ha demostrado directamente mediante experiencias de gabinete que los vapores acuosos, al condensarse, desarrollan electricidad positiva; de donde *deduce que la condensación de los vapores en las altas regiones de la atmósfera es la causa de la electricidad de las nubes*, y que si una nube puede producir varios rayos es por efecto de una condensación continua.

6°. Los trabajos recientes de M. Thomson y los de MM. Mascart y Joubert prueban que, en un cielo sin nubes, el potencial eléctrico del aire crece proporcionalmente á la altura á que se sube. M. Thomson halló en Aberdeen, en una playa á orillas del mar, una variación de 100 volts por metro. MM. Mascart y Joubert observaron una variación de 300 volts, ó sea *una unidad electrostática* por metro. Si este aumento de potencial se debiera á una carga difundida por el suelo, se necesitaría que ésta fuera negativa é igual á 10^{-13} coulombs por centímetro cuadrado, lo que correspondería á una tensión eléctrica muy escasa, igual únicamente á un semi-millonésimo de dina.

7°. *Origen de la electricidad atmosférica.* — Se ha tratado de hacerla depender, sea del fenómeno de la evaporación, sea de corrientes inducidas por la rotación terrestre en las capas superiores de la atmósfera consideradas como conductoras. En el primer caso se supone que el vapor de agua arrastra consigo electricidad positiva robada al suelo, que entonces queda cargado negativamente. Las auroras boreales se explican por la segunda hipótesis.

1134. **Relámpago.** — El *relámpago* es una luz deslumbradora proyectada por la chispa eléctrica que salta de las nubes cargadas de electricidad. La luz de los relámpagos es blanca en las regiones inferiores de la atmósfera; pero en las altas donde el aire está más enrarecido, aquélla toma un tinte violáceo, como lo hace en idénticas circunstancias la chispa de la máquina eléctrica.

Los relámpagos tienen á veces varias leguas de longitud. Su paso á través del aire se opera generalmente en zig-zag. Este fenómeno se atribuye á la resistencia que presenta el aire comprimido por el paso de una fuerte descarga. La chispa se desvía entonces de la línea recta para tomar la dirección con arreglo á la cual la resistencia es menor. En efecto, en el vacío la transmisión eléctrica no se produce en zig-zag.

Se distinguen tres clases de relámpagos: 1°. Los relámpagos en zig-zag que se mueven con una velocidad extrema, bajo la forma de una línea de fuego de contornos perfectamente determinados y que son en todo comparables á la chispa de las máquinas eléctricas[1]. 2°. Los relámpagos, que, en vez de ser lineales como los precedentes llenan todo el horizonte, sin presentar ningún contorno aparente á la manera de una explosion súbita de substancias inflamables. Estos relámpagos, que son los más frecuentes, parecen producirse en el seno mismo de la nube iluminando su masa. 3°. Los relámpagos en forma de bola; éstos, que son en ocasiones visibles durante más de diez segundos, bajan de las nubes á la tierra con bastante lentitud para que la vista pueda seguirlos. Estos globos rebotan á veces sobre la superficie del suelo; otras veces se disgregan y estallan con un ruido comparable á la detonación de varias piezas de artillería. Se ha

1. El relámpago de esta forma no es sino una apariencia cuya realidad no ha sido confirmada por la fotografía instantánea. La figura 527 indica la verdadera forma de los relámpagos.

observado que bajo esa forma es como penetra generalmente el rayo en el interior de los edificios. No se conoce el origen de esos relámpagos.

En cuanto á los relámpagos llamados *relámpagos de calor* porque brillan en las noches de verano sin que se observe ninguna nube sobre el horizonte ni se oiga ruido alguno, no son más que relámpagos ordinarios que se producen en nubes situadas por debajo del horizonte y á una distancia tal que el ruido del trueno no puede llegar hasta el observador.

Duración. — La duración de los relámpagos no es de una milésima de segundo, lo que ha sido demostrado por Wheatstone por medio de una rueda que se hace girar bastante de prisa para que sus radios sean invisibles; pero iluminándolos con la luz de un relámpago la duración es tan corta que, sea cual fuese la velocidad de rotación de la rueda, ésta aparece completamente inmóvil, es decir, que su desplazamiento no es sensible mientras dura el relámpago.

1135. **Ruido del trueno.** — El *trueno* es la detonación violenta que sucede al relámpago en las nubes tempestuosas. El relámpago y la detonación son siempre simultáneos; pero se observa un intervalo de varios segundos entre ambos fenómenos, lo que proviene de que el sonido sólo recorre unos 337 metros por segundo mientras que la luz no emplea más que un intervalo inapreciable para propagarse desde la nube hasta el observador. En consecuencia, éste no oye el ruido del trueno más que cinco ó diez segundos después de haber visto el relámpago, según que se halle cinco ó diez veces á 337 metros de la nube tempestuosa.

El ruido del trueno resulta de la sacudida que excita en la nube y en el aire la descarga eléctrica, sacudida que la experiencia del termómetro de Kinnersley hace patente. Cerca del sitio en que salta el rayo, el ruido del trueno es seco y de escasa duración. Más lejos se oyen una serie de ruidos que se suceden rápidamente. Á distancia mayor todavía, el ruido, débil al principio se cambia en un retumbar prolongado, de densidad muy desigual.

Explicación. — Se han propuesto numerosas hipótesis explicando el retumbar del trueno; pero ninguna es completamente satisfactoria. Unos lo han atribuido á la reflexión del sonido sobre la tierra y sobre las nubes; otros han considerado al relámpago no como una sola chispa, sino como una serie de chispas elementales que producen una detonación particular. Esas detonaciones parciales parten de puntos diversamente lejanos, y de zonas de densidad desigual, de donde resulta que no sólo llegan al oido del observador sucesivamente, sino que producen en dicho órgano sonidos diversamente intensos, lo que ocasiona la duración y la desigualdad del retumbar del trueno. En fin, también se ha atribuido el fenómeno á los zig-zags mismos del relámpago, admitiendo que hay un máximum de compresión del aire en cada ángulo saliente, lo que produce la desigual intensidad del sonido.

El máximum de duración del ruido del trueno observado en Paris es de 35 á 45 segundos. En las montañas, esta duración es mayor.

1136 **Efectos del rayo.** — El *rayo* es la descarga eléctrica que se opera entre una nube tempestuosa y el suelo. Este, bajo la influencia de la electricidad de la nube, se carga de electricidad contraria, y cuando el esfuerzo que efectuán las dos electricidades para reunirse es superior á la resistencia del aire, la chispa salta, lo que se indica en el lenguaje ordinario diciendo que cae el rayo; pero no hay que entender por eso que el rayo se dirige preferentemente de arriba abajo. Como las chispas artificiales, el rayo tiende á herir en todos sentidos, dirigiéndose siempre hacia los objetos más próximos y que se encuentren en relación más intima con el suelo. Por lo demás, también se observan casos de *rayo ascendente*, que se producen probablemente, cuando las nubes están electrizadas negativamente, y en consecuencia, la tierra positivamente; pues todas las experiencias prueban que á la presión ordinaria, el fluido positivo atraviesa más fácilmente la atmósfera que el fluido negativo.

Con arreglo á la primera ley de las atracciones eléctricas, el rayo debe caer sobre los objetos más cercanos á la nube y mejores conductores. Se observa, en efecto, que lo que atrae particularmente el rayo son los árboles, los edificios elevados y los metales. Por eso es tan peligroso en momentos de tempestad colocarse bajo los árboles, sobre todo si éstos son buenos conductores, como las encinas y los olmos. Pero el peligro no es el mismo bajo los árboles resinosos, como los pinos, porque esta clase conduce mal la electricidad.

Los efectos del rayo son muy variados y de la misma naturaleza que los de las baterías; pero con una intensidad mucho más considerable. El rayo mata al hombre y á los animales, inflama las materias combustibles, funde los metales y rompe los cuerpos poco conductores.

Fulguritas. — Al penetrar en el suelo, el rayo funde las materias silicatadas que encuentra en su camino, y así se producen, en la dirección de la descarga, tubos vitrificados (fig. 1011), que se denominan *tubos fulminares ó fulguritas*, y que tienen hasta 10 metros de largo.

Por último, al caer sobre las barras de hierro, las imanta, y á menudo invierte los polos de las agujas en las brújulas.

El rayo difunde á su paso un olor que se ha comparado con frecuencia al del azufre inflamado ó de una materia fosforosa. Este olor ha sido atribuído á un compuesto oxigenado que se forma bajo la influencia de la descarga eléctrica, al que se ha dado al nombre de *ozono*. Schœnbein, en 1840, luego Marignac y de la Rive y por fin MM. Edmond Becquerel y Fremy han demostrado que el ozono no es más que oxígeno electrizado.

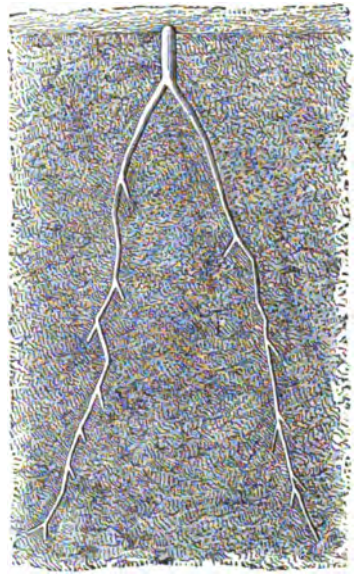


Fig. 1011.

1137. **Pararrayo.**—Un *pararrayo* es una barra de hierro destinada á presentar una salida fácil á la electricidad del suelo, atraída por la electricidad contraria de las nubes tempestuosas. El pararrayo fué inventado por Franklin en 1755

Descripción. — Se distinguen en un pararrayo dos partes : la *barra* y el *conductor*. La *barra* es rectilínea y de hierro; se la coloca en la cúspide de los edificios que se trata de preservar; tiene de 6 á 9 metros de altura y su sección, en la base, es un cuadrado de 5 á 6 centímetros de lado. Esa barra termina en un punta, que debe ser de un *metal inalterable* : el mejor parece ser el cobre dorado. No hay que hacer demasiado aguda la punta, porque el rayo podría fundirla. Ordinariamente se *atornilla* y luego se suelda en la extremidad superior de la barra de hierro un cilindro de cobre de 17 centímetros de altura y de 2 centímetros de diámetro, terminado por un cono de 3 centímetros de altura (fig. 1012). El *conductor* es una barra de hierro, que baja desde el pie del pararrayo hasta el suelo, en el cual penetra profundamente. Como las barras de hierro no pueden fácilmente, por causa de su rigidez, seguir los contornos de los edificios, es preferible formar el conductor con cuerdas de alambre de hierro, como las que se emplean en los puentes suspendidos. La Academia de ciencias ha publicado, hace algunos años, un informe sobre los pararrayos, en el cual recomendaba emplear hilos de cobre rojo con preferencia á los alambres de hierro en la fabricación de las cuerdas destinadas á servir de conductor, pues el cobre rojo conduce la electricidad mejor que el hierro. Estas cuerdas deben tener 1 centímetro cuadrado de sección métrica, y los alambres de 1 milímetro á

Fig. 1012.

1mm.5 de diámetro; pueden ser cuerdas de tres hilos como las cuerdas ordinarias. El mismo informe aconseja terminar la barra de los pararrayos en una punta de cobre rojo más bien que de platino, siempre por causa de la mayor conductibilidad.

El conductor se introduce ordinariamente en un pozo, y para mejor establecer la comunicación con el suelo, se le termina en dos ó tres ramificaciones. Si no hay pozo en las inmediaciones, se practica en el suelo un agujero de 4 á 6 metros de profundidad, y después de haber metido en él el pie del conductor, se acaba de llenar el agujero con brasa de panadero, que conduce bien.

Teoría. — La teoría de los pararrayos se funda en la electrización por influencia y en el poder de las puntas. Franklin admitía que las puntas de pararrayo roban á la nubes tempestuosas su electricidad; lo contrario es lo que ocurre. Cuando una nube tempestuosa, electrizada positivamente por ejemplo, se forma en la atmósfera, obra por influencia sobre la tierra, rechaza la electricidad positiva y atrae la negativa, que se acumula sobre los cuerpos colocados en la superficie del suelo, con tanta mayor abundancia, cuanto más elevados se hallen. Los más altos son los que poseen entonces una tensión más considerable, y los que, por consiguiente, se encuentran más expuestos á la descarga eléctrica; pero si los cuerpos están armados de puntas metálicas como las varillas de los pararrayos, la electricidad negativa arrancada al suelo por la influencia de la nube, se pierde en la atmósfera y va á neutralizar la electricidad positiva de la nube. Por consiguiente, un pararrayo se opone no sólo á la acumulación de la electricidad en la superficie de la tierra, sino que también tiende á volver al estado neutro las nubes tempestuosas, doble efecto que tiene por objeto prevenir la caída del rayo. Sin embargo, el desprendimiento de electricidad es á veces tan abundante, que el pararrayo no basta para descargar el suelo y la chispa salta; pero entonces el pararrayo es el que recibe la descarga, por razón de su mayor conductibilidad y el edificio queda preservado.

Experiencia. — La experiencia enseña que una barra ó varilla de pararrayo protege á su alrededor un espacio circular de radio doble de su altura. En consecuencia, un edificio de 64 metros de longitud es preservado por dos pararrayos de 8 metros, colocados á la distancia de 32 metros.

Un pararrayo, para ser eficaz, debe satisfacer á las condiciones siguientes: 1°. La varilla debe ser bastante gruesa para que el rayo no la funda al atravesarla; 2°. debe terminar en punta para dar salida más fácilmente á la electricidad que se desprende del suelo; para satisfacer á esta condición se termina ordinariamente el pararrayo en una punta de platino ó de cobre rojo dorado, á fin de evitar la oxidación; 3°. el conductor no debe presentar ninguna solución de continuidad desde la varilla hasta el suelo; 4°. la comunicación entre la varilla y el suelo debe ser lo más íntima posible; 5°. si el edificio que se protege contiene piezas metálicas de cierto tamaño, como una techumbre de zinc, canalones de metal, armazones de hierro, se debe poner todo eso en comunicación con el conductor del pararrayo.

Si las tres últimas condiciones no son satisfechas se estará expuesto á las *descargas laterales*, es decir, entre el conductor y el edificio, y entonces el pararrayo no hace más que aumentar el peligro. Hay que recordar que *un pararrayo mal construido es más peligroso para un edificio que la carencia de pararrayo.*

Fig. 1013.

1138. **Pararrayos Melsens.** — Desde hace algunos años se construyen, con arreglo á las indicaciones de M Melsens, de Bruselas, pararrayos mucho menos voluminosos que el de Franklin, menos costosos y que parecen por lo menos tan eficaces como éstos.

El pararrayo Melsens es una aplicación de un principio de electricidad estática

demostrado antes; á saber, que *en el interior de un cuerpo conductor que comunica con el suelo, no puede producirse ningún efecto de influencia electroestática.* Por consiguiente, se sustraerá del todo un edificio á la acción del rayo rodeándolo de una especie de enrejado metálico que comunique con el suelo. Se realiza eso haciendo pasar á lo largo de la cresta de los techos y de los ángulos de los muros conductores de hierro, enlazados unos con otros y puestos en comunicación con el suelo por un gran número de puntos. Á ese sistema de preservación se añade el de Franklin. Para ello, se colocan en todas las intersecciones manojos de puntas delgadas de cobre, que constituyen pequeños pararrayos de puntas múltiples, por donde la electricidad puede salir fácilmente al exterior. El Ayuntamiento de Bruselas, los mataderos de la Villette y el Hotel Sévigné, en París, están provistos de pararrayos Melsens. La figura 1013 representa una instalación de ese género.

1139. **Aurora boreal.** — Se llama *aurora boreal* ó más bien *aurora polar,* á un fenómeno luminoso en extremo notable que aparece con frecuencia en la atmósfera en los dos polos terrestres. Cuando el fenómeno se produce en el polo norte, se le da el nombre de *aurora boreal;* el de *aurora austral* cuando se manifiesta en el polo sur. Parece resultar de numerosas observaciones practicadas en Melbourne y en el norte de Europa que las auroras boreales y las australes son simultáneas.

Descripción. — Tomamos del *Tratado de meteorología* de MM. Becquerel la descripción siguiente de una aurora boreal observada en Bossekop, en la Laponia Noruega, á 70 grados de latitud, en el invierno de 1838.

« Por la tarde, entre las cuatro y las ocho, la bruma que reina habitualmente al norte de Bossekop se colora en la parte superior. Este resplandor se hace

Fig. 1014.

regular y forma un arco vago, de un amarillo pálido, que vuelve su concavidad hacia la tierra, y cuyo vértice se encuentra sensiblemente en el meridiano magnético.

« Pronto unas estrías negruzcas separan regularmente las partes luminosas del arco. Fórmanse rayos luminosos que se alargan y se acortan lenta ó instantáneamente, aumentando ó disminuyendo de brillo de una manera sensible. Los pies de esos rayos presentan siempre la luz más viva y forman un arco más ó menos regular. Su longitud varía mucho; pero todos convergen hacia un mismo punto del cielo, indicado por la prolongación del extremo sur de la aguja de inclinación; á veces los rayos se prolongan hasta su punto de cruce, y representan así el fragmento de una cúpula luminosa.

« El arco continúa subiendo hacia el zenit, presentando en su resplandor un movimiento ondulatorio. Á veces uno de sus pies, y en ocasiones los dos abandonan el horizonte. Entonces los pliegues son más pronunciados y numerosos, y el arco queda reducido á una ancha banda de rayos que se pliega y se separa en varias partes, formando graciosas curvas que constituyen lo que se llama la *corona boreal*. El brillo de los rayos, variando súbitamente de intensidad, alcanza el de las estrellas de primera magnitud; los rayos centellean rápidamente y se desarrollan como los pliegues de una serpiente (fig. 1014). Luego los rayos se tiñen de diversos colores: la base es roja, el centro verde, el resto conserva su color amarillo claro. Por último, el resplandor disminuye, los colores se extinguen, todo se debilita poco á poco ó desaparece de pronto. »

La comisión científica del Norte ha observado, en 200 días, 150 auroras boreales; pero parece que en el polo norte las noches sin aurora boreal son excepcionales, de manera que se puede admitir que ese fenómeno se produce cada noche, aunque con intensidad muy variable. Las auroras boreales son visibles á distancias considerables del polo y en una extensión inmensa. Á veces una misma aurora boreal ha sido vista desde Moscou, Varsovia, Roma y Cádiz.

Explicación. — Se han hecho numerosas hipótesis sobre la causa de las auroras boreales. La dirección constante de su arco respecto del meridiano magnético, y las perturbaciones que esos fenómenos ejercen sobre las brújulas, indican que se debe atribuirlas á corrientes magnéticas que se dirigen desde los polos hacia las altas regiones de la atmósfera. Esta hipótesis está confirmada por el hecho, observado el 29 de Agosto y el 1.° de Septiembre de 1859, en Francia y en casi toda Europa, de que dos brillantes auroras boreales ejercieron una poderosa acción sobre los hilos de los telégrafos eléctricos: los timbres se agitaron durante largo tiempo y los despachos eran interrumpidos con frecuencia por el funcionamiento espontáneo y anormal de los aparatos.

Según de la Rive, las auroras boreales se deben á descargas eléctricas que se operan en las regiones polares, entre la electricidad positiva de la atmósfera y la electricidad negativa del globo terrestre, electricidades separadas á su vez por la acción del sol, principalmente en las regiones ecuatoriales.

METÉOROS LUMINOSOS.

1140. **Arco iris.** — El *arco iris* es un meteóro luminoso que aparece en las nubes opuestas al sol cuando éstas se resuelven en lluvia; lo forman siete arcos concéntricos que presentan sucesivamente las colores del espectro solar. Á veces no se observa más que un arco iris; pero con frecuencia se ven dos; uno, interior, cuyos colores son vivos; otro, exterior, que es más pálido y en el cual el orden de los colores se halla invertido. En el arco interior el más elevado es el rojo: en el otro el violado. Raras veces se presentan tres arcos iris; la teoría indica que puede formarse un número más considerable, pero sus colores son tan débiles, que la vista no puede percibirlos.

La descomposición de la luz blanca del sol en el momento en que penetra en las gotas de lluvia y su reflexión sobre su cara interna, son las causas que producen el fenómeno del arco iris. Este fenómeno se observa, en efecto, en las gotas de rocío, en los saltos de agua, en una palabra, dondequiera que la luz solar penetra en las gotas de agua bajo cierto ángulo.

La aparición del arco iris y su dimensión dependen de la posición del observador y de la altura del sol por encima del horizonte; de donde se debe deducir que todos los rayos refractados por las gotas de lluvia y reflejados sobre su concavidad hacia la vista del observador no son propios para producir el fenómeno. Los que pueden originarlo han recibido el nombre de *rayos eficaces*.

La luna produce también arcos iris pero muy pálidos.

1141. **Halos.** — Los *halos* son unos círculos irisados que aparecen en ocasiones alrededor del sol y le son concéntricos. El halo es tan pronto sencillo, esto es, formado por un solo círculo, como doble, ó lo que es lo mismo, formado por dos círculos. En ambos casos la banda roja se encuentra por dentro y la violada por fuera pálida y difusa. El semi-diámetro aparente del halo pequeño es de 23°, y el del grande de 46° (fig. 1015).

Los halos tienen por causa la descomposición de la luz solar á través de prismas de hielo muy pequeños de que ciertas nubes están formadas. El aeronauta

Duruof ha encontrado en una de sus ascensiones una nube de esa clase á la altura de 3500 metros.

1142. **Parhelios, círculos parhélicos, coronas.** — Se llama *parhelios* ó *falsos soles*, á unas imágenes pálidas del sol que aparecen en ocasiones en los extremos del diámetro horizontal del halo pequeño, un poco hacia fuera (fig. 1015). Se explican los parhelios admitiendo que los prismas de hielo, al caer en el espacio en vir-

Fig. 1015.

tud de su peso, lo hacen en mayor número en la posición vertical que presenta menos resistencia al aire, y que, por consiguiente, los rayos eficaces son más abundantes en el plano horizontal que pasa por el centro del sol. De ahí un brillo mayor en los puntos en que el halo exterior, es cortado por este plano. También se producen parhelios en el halo exterior, pero mucho menos intensos.

El *círculo parhélico* ó *círculo blanco* porque carece de color, es un círculo horizontal AB que pasa por el centro del sol.

Su carencia de color prueba que no es un fenómeno de refracción, sino sólo de reflexión sobre las facetas de los prismas de hielo.

Por último, se denomina *coronas* á unos círculos concéntricos al sol y á la luna, que aparecen cuando algunas nubes ligeras pasan por delante de dichos astros. Las coronas son tres ó cuatro, el rojo en el exterior y el violado hacia dentro. El diámetro aparente de la más pequeña es de 1 á 2 grados. La causa de este fenómeno son los rayos que emergen, á cada incidencia interior, de las gotecillas interpuestas entre el astro y la persona que observa.

CAPÍTULO II

CLIMATOLOGÍA.

1143. **Temperatura media.** — Se llama *temperatura media*, ó sencillamente *temperatura de un día*, á la que se obtiene haciendo la suma de 24 observaciones ter-

ométricas tomadas sucesivamente de hora en hora, y dividiéndola por 24. La experiencia ha enseñado que se obtiene con mucha aproximación esa temperatura tomando la media entre las temperaturas máxima y mínima del día y de la noche, las cuales se determinan por medio de los termómetros de máxima y de mínima. Estos intrumentos deben hallarse al abrigo de los rayos solares, elevados sobre el suelo, y alejados de todo cuerpo que pueda influenciarlos por su radiación.

La temperatura de un mes es la media de los treinta días, y la temperatura del año la media de la de los doce meses. En fin, la *temperatura de un lugar* es la media de su temperatura anual durante un gran número de años. En todos los casos, esas temperaturas son las del aire y no las del suelo.

La temperatura media verdadera de una región no puede determinarse con el termómetro colocado en una ventana ni dentro de una ciudad, según lo ha probado M. Renou. La de París es actualmente de 9°,9.

1144. **Causas que modifican la temperatura del aire.** — Las causas que hacen variar la temperatura del aire son principalmente la latitud, la altura, la dirección de los vientos y la proximidad de los mares.

1°. *Influencia de la latitud.* — La influencia de la latitud resulta de la mayor ó menor oblicuidad de las rayos solares; pues la cantidad de calor absorbida es tanto más grande cuanto más se acercan los rayos á la incidencia normal; de ahí resulta que el calor absorbido por el suelo decrece del ecuador hacia los polos, puesto que los rayos van haciéndose cada vez más oblicuos respecto del horizonte. Sin embargo, esta pérdida se halla compensada en parte, durante el vernao, en las zonas templadas y glaciales por la prolongación de los días. Bajo el ecuador, donde la longitud de los días es constante, la temperatura es casi constante; en la latitud de París, y en las regiones más septentrionales, donde los días son muy desiguales, la temperatura varía mucho; pero en verano sube casi tanto como en el ecuador. Por lo demás, el descenso de la temperatura que resulta de la latitud es lento; así por ejemplo : en Francia hay que marchar 185 kilómetros hacia el norte para hallar un enfriamiento de un grado en la temperatura media del aire.

2°. *Influencia de la altura.* — La altura, es decir, la elevación sobre el nivel del mar, imprime á la temperatura de la atmósfera un descenso mucho más rápido que el que resulta de la latitud. En efecto, en una ascensión al Monte Blanco, Saussure ha observado un descenso de temperatura de un grado para una altura de 144 metros, y de Humboldt, en el Chimborazo, halló disminución de 1 grado para 218 metros. Tomando la media entre esos dos números, resulta un enfriamiento de 1 grado para una altura de 181 metros, lo que da un descenso de temperatura casi mil veces más rápido para la altura que para la latitud.

La ley del descenso de la temperatura cuando se sube en la atmósfera no es conocida, por efecto de las numerosas causas perturbadoras que tienden á modificarla, las cuales son los vientos reinantes, el grado de humedad, la hora del día, etc. La experiencia enseña que la diferencia de temperatura de dos lugares desigualmente elevados no es proporcional á la diferencia de nivel, pero que, tratándose de alturas poco considerables, se puede admitir aproximadamente esta ley. Se calcula por término medio el descenso de la temperatura del aire en 1 grado por 187 metros de elevación en la zona tórrida, y en 1 grado por 150 metros en la templada; pero esas cifras pueden variar mucho según las circunstancias locales.

El enfriamiento del aire á medida que se sube se le observa en las ascensiones aerostáticas; lo que también prueba ese hecho son las nieves perpetuas que cubren las cimas de las altas montañas. En los Alpes, el límite de las nieves persistentes se encuentra á la altura de 2710 metros ; en Quito, bajo el ecuador, es de 4800 metros. Las causas de la baja temperatura que reina en las altas regiones de la atmósfera son : 1°. el gran enrarecimiento del aire, que disminuye su poder absorbente; 2°. la lejanía del suelo, que impide que éste caliente al aire por su contacto; 3°. el gran poder diatérmano de los gases; 4°. en fin, la disminución de presión, por efecto de la cual se dilata considerablemente el aire caliente que se eleva viniendo del suelo, y ya se ha visto que esta dilatación es una causa de frío intenso.

3°. *Influencia de la dirección de los vientos.* — Como los vientos participan necesariamente de la temperatura de los países que han atravesado, su dirección, para un mismo lugar, tiene una gran influencia sobre la temperatura del aire. En

París, el viento más caliente es el viento sur; en seguida vienen los vientos del sudeste, del oeste, del este, del noroeste, del norte, y por último el del nordeste, que es el más frío. Por lo demás el carácter de los vientos cambia con las estaciones : por ejemplo, el viento del este, que es frío en invierno, es templado en el estío.

4°. *Influencia de la proximidad de los mares.* — La proximidad de los mares tiende á elevar la temperatura del aire y á hacerla más uniforme. En efecto, se observa que, bajo los trópicos y en las regiones polares sobre todo, la temperatura de los mares es siempre más alta que la de la atmósfera. En cuanto á la uniformidad de la temperatura de los mares, la experiencia enseña que, en las regiones templadas, esto es, de 25 á 50° de latitud, la diferencia de temperatura entre el máximum y el minimum de un día no pasa sobre las aguas de 2 á 3°, mientras que sobre los continentes esta diferencia puede llegar hasta 12 ó 15°. En las islas, la uniformidad de temperatura es muy sensible, aun durante los fuertes calores. Penetrando en los continentes, los inviernos, dada igual latitud, se hacen más fríos, y la diferencia entre las temperaturas de los veranos y de los inviernos es mayor.

5°. *Influencia de las ciudades.* — La influencia de las ciudades modifica de una manera notable la media de las temperaturas; las mínimas son en ellas menos bajas y las máximas casi siempre más elevadas que en los campos. Así, hablando de París, donde se han hecho estudios acerca del particular, M. Angot ha observado entre las medias obtenidas por el observatorio del parque Saint-Maur y las de la Oficina central meterológica, una diferencia de 1° en 1889; 0°,96 en 1890 y 1°,05 en 1891. Para 1892, M. José Jaubert, que ha hecho las mismas comparaciones entre los números suministrados por el observatorio del parque Saint-Maur y los del de la Torre Saint-Jacques, situado en el centro mismo de la capital, señaló en dicho año un exceso de 0°.72. Vese que la influencia de las ciudades es bastante sensible, y puede dar en ciertos casos una media superior en 1° á la media exacta de la región.

1145. **Líneas isotermas.** — Cuando se unen entre sí, sobre un mapa, todos los puntos cuya temperatura media es la misma, se obtienen curvas que de Humboldt fué el primero en dar á conocer, designándolas por el nombre de *líneas isotermas ó isotérmicas.* Si la temperatura de un lugar no variase más que con la oblicuidad de los rayos solares, esto es, con la latitud, las líneas isotermas serían todas paralelas al ecuador : pero como esta temperatura varía bajo la influencia de diversas causas locales, y sobre todo con la altura, aquellas líneas son siempre más ó menos sinuosas. Sin embargo, á través de los mares se alejan poco del paralelismo. También se distinguen las *líneas isoteras ó isotéricas* (de verano igual) y las líneas *isoquímenas* (de igual invierno). En fin, se llama *zona isotérmica* al espacio comprendido entre dos líneas isotermas.

Las figuras 1016 y 1017 representan, según Humboldt, las sinuosidades de las líneas isotérmicas en los dos hemisferios norte y sur, hallándose éstos trazados en proyección estereográfica sobre el plano del ecuador. Las líneas isotérmicas corresponden en esas figuras á las temperaturas medias de 5 en 5°, desde — 15 hasta + 25°. Más allá se encuentra el *ecuador térmico*, es decir, la línea que reune todos los puntos que tienen la temperatura anual más elevada. Esa línea está marcada + 28°. Se ve que no es paralela al ecuador, sino que se aleja en el golfo de Omán hasta llegar casi al 15° paralelo; luego pasa al hemisferio sur á las islas Célebes, se acerca á las islas Salomón y vuelve á cortar el ecuador de la tierra en los 157° de longitud occidental.

Examinando la figura 1016, se observa que al acercarse al polo norte, las curvas isotérmicas se alargan cada vez más del este al oeste, y que una vez que se pasa de la línea — 15° hay desdoblamiento en dos curvas distintas alrededor de dos puntos P, P', que se llaman *polos del frío*, cuya temperatura media calculó Arago en — 25°. Uno de esos polos se encuentra en América, cerca de las islas Parry, y el otro en Asia.

Las líneas isotérmicas del hemisferio austral son menos conocidas que las del hemisferio norte; la figura 1017 indica que su regularidad es mayor, lo que resulta de los vastos mares del hemisferio sur.

Por medio de las líneas isotérmicas es fácil seguir, en la superficie de la tierra, las zonas caracterizadas por el rigor ó la benignidad de su temperatura media. Por ejemplo, la zona templada de + 10 á + 15°, que en Europa está comprendida

entre las latitudes de 50 á 42°, se halla situada en la América del Norte entre las latitudes mucho más meridionales de 40 á 36°.

1146. **Climas.** — Se comprende bajo el nombre general de clima el conjunto de

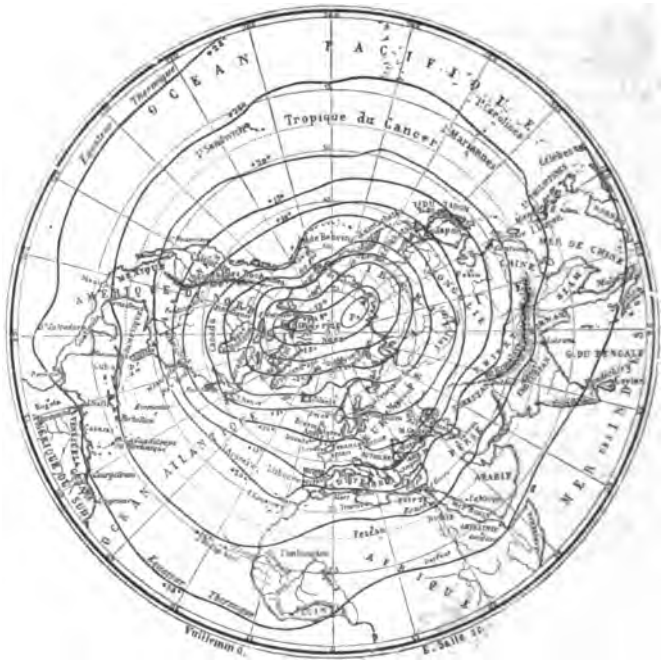


Fig. 1016.

las condiciones atmósfericas que caracterizan una región : la temperatura media anual, las temperaturas estival é invernal, la humidad del aire y del suelo, los vientos, la presión barométrica, la pureza del cielo. Clasificados con arreglo á su temperatura media anual, los climas se dividen en siete principales : 1° *clima ardiente* de 27°,5 á 25° ; — 2° *clima cálido* de 25° á 20° ; — 3° *clima suave*, de 20° á 15° ; — 4° *clima templado*, de 15° á 10° ; — 5° *clima frío*, de 10° á 5° ; — 6° *clima muy frío*, de 5° á cero ; — 7° *clima glacial*, por bajo de cero.

Estos climas se dividen á su vez en *climas constantes*, en los que la diferencia de temperatura entre el invierno y el verano no pasa de 6 á 8° ; en *climas variables*, en los cuales esa misma diferencia se eleva de 16 á 20 ; y en *climas excesivos*, donde esa diferencia pasa de 30°. Los climas de París y de Londres son variables; los de Pekín y de Nueva York, excesivos. Los climas de las islas son en general poco variables, porque la temperatura del mar es casi constante : de ahí también la distinción en *climas marinos* y en *climas continentales*. El carácter de los climas marinos es que la diferencia de temperatura entre el verano y el invierno es siempre mucho menor que en los climas continentales. Por lo demás, como se ha visto anteriormente, la temperatura más ó menos elevada no es el único carácter que determina los climas ; también se diferencian por la humedad del aire, la cantidad y la frecuencia de las lluvias, el número de las tempestades, la dirección é intensidad de los vientos, y en fin por la naturaleza del suelo. Estas causas reunidas hacen que el estudio de los climas, ó *climatología*, sea aún un orden de estudios poco conocido.

1147. **Distribución de la temperatura en la superficie del globo.** — La temperatura del aire en la superficie del globo va decreciendo del ecuador hacia los polos; pero está sometida á causas perturbadoras tan numerosas y tan locales, que su

Fig. 1017.

descenso no parece obedecer á ninguna ley general. Hasta ahora lo único que se ha podido hacer, por medio de observaciones numerosas, es determinar la temperatura media de cada lugar.

Temperaturas medias en diversas latitudes.

Ecuador	26°,5	Marsella	14°,1
Cayena	26°,4	Ginebra	9°,2
San Luis (Senegal)	23°,2	París	9°,0
Biskra	21°,5	Neele (Bruselas)	8°,7
Argel	17°,0	Cabo Norte	0°
Buenos Aires	15°,1	Isla Melville	18°,7

Esas temperaturas son las medias; la temperatura más alta observada en la superficie del globo ha sido de 47°,4, en Esné, en Egipto, y la más baja, de — 56°,7 en Fort-Reliance en el norte de América: lo que da una diferencia de 104°,1 entre las temperaturas observadas en los diferentes puntos del globo.

La temperatura más elevada que se recuerda en París fué de 40°, el 27 de Agosto de 1765, y la más baja de — 23°,5 el 23 de Enero de 1795.

1148. **Temperatura de los mares, corrientes marinas.** — La temperatura del mar entre los trópicos es generalmente en la superficie casi la misma que la del aire; en las regiones polares el mar está siempre más caliente que la atmósfera.

La temperatura del mar, en la zona tórrida, es constantemente de 26 á 27°, en

la superficie; cuando la profundidad aumenta disminuye, y en las regiones tropicales como en las templadas la temperatura del mar á grandes profundidades se mantiene entre 1°,7 y 3°,5. Se explica la baja temperatura de las capas inferiores por efecto de las corrientes submarinas que llevan hacia el ecuador el agua fría de los mares polares mientras que otras corrientes calientes, dirigiéndose desde el ecuador hacia los polos, atenúan la intensidad del frío en esas latitudes elevadas.

La más importante de las corrientes marinas es la corriente del golfo (*Gulf Stream*) descubierta por Maury. El camino total que recorre esa corriente, contando la ida y la vuelta, es de unos 28000 kilómetros, y su anchura alcanza en algunas partes hasta varios centenares de leguas. Los navegantes la reconocen fácilmente en su temperatura, que se eleva hasta 22° y 27°. Atravesando el Atlántico del este al oeste, alcanza el cabo San Roque al norte del Brasil, sigue las costas de la América del sur hasta el golfo de México, de donde sale para dirigirse hacia el norte. Al llegar al banco de Terranova, se bifurca en dos corrientes secundarias, una de las cuales sube hasta Islandia y Noruega, para ir á perderse en el mar Glacial; mientras que la otra, volviendo hacia el sur, llega al golfo de Gascuña, y vuelve hacia el trópico, costeando el nordeste de África.

En el Océano Pacífico existe también una gran corriente marina, que se dirige desde el golfo de Bengala hacia el estrecho de Bering. Todas esas corrientes tienen por causa la diferencia de temperatura, y, por consiguiente, de densidad, entre las aguas calientes del mar bajo los trópicos y las aguas frías de los mares glaciales, y también la dirección de los vientos y la configuración de las costas y de los fondos submarinos.

Se ha admitido durante mucho tiempo que en el fondo de los mares existía una capa invariable á 4°; pero las numerosas sondas operadas desde hace algunos años por las marinas francesa é inglesa han hecho ver que en las regiones templadas y en las tropicales, la temperatura media de los dos océanos es de 2°,6. Anteriormente se ha visto que esta baja temperatura se debe á corrientes de fondo, que van de los polos hacia el ecuador, mientras que otras corrientes de superficie, más calientes y menos densas, van del ecuador hacia los polos.

Teniendo en cuenta las enormes presiones que se ejercen en los mares profundos, se creía que la vida animal no podía existir en ellos; pero la sonda ha traído á la superficie gran número de seres de orden inferior, admirables por sus formas y sus colores, y dotados casi todos de una fosforescencia deslumbradora, como para suplir á la luz del día.

1149. **Temperatura de los lagos y de las fuentes.** — La temperatura de los lagos presenta variaciones mucho más grandes que la de los mares; su superficie, que puede congelarse durante el invierno, se calienta en verano hasta 20 á 25°. El fondo, por el contrario, conserva sensiblemente una temperatura de 4°, que es la del máximum de densidad del agua.

Las fuentes, provenientes de las aguas de lluvia que se han infiltrado en la costra terrestre hasta profundidades más ó menos considerables, tienden necesariamente á ponerse en equilibrio de temperatura con las capas terrestres que atraviesan. Por consiguiente, cuando llegan á la superficie del suelo, su temperatura depende de la profundidad que han alcanzado; si esta profundidad es la de la capa invariable, la temperatura de las fuentes es de 11 á 12° en los climas templados, pues esa es en ellos la temperatura de dicha capa, y también con corta diferencia, la temperatura media anual. Sin embargo, si la fuente es poco abundante, su temperatura es elevada en estío y fría en invierno por la influencia de las capas que atraviesa para llegar desde la capa invariable hasta la superficie del suelo. Pero si las fuentes vienen de una profundidad mayor que la á que se encuentra la capa invariable, su temperatura puede ser mucho más elevada que la temperatura media del lugar, y en ese caso se llaman *aguas termales*. He aquí la temperatura de algunas de esas fuentes:

En Francia.	Vichy.	40°
—	Mont-Dore.	44°
—	Bourbonne.	50°
—	Dax (Landas).	60°
—	Chaudes-Aigues.	88°
En América.	Trincheras, cerca de Puerto Cabello. . .	97°
En Islandia.	El Gran-Geyser á 20 metros de profundidad.	124°

Las aguas termales adquieren, por efecto de su alta temperatura, la propiedad de disolver algunas de las sustancias minerales que encuentran á su paso, y entonces se las llama *aguas minerales*. Las sustancias que contienen en disolución son generalmente los ácidos sulfuroso, sulfhídrico, clorhídrico, sulfúrico, y también sulfuros, hiposulfitos, sulfatos, carbonatos, cloruros y yoduros.

La temperatura de las aguas termales no es modificada, en general, por la abundancia de las lluvias ó por las sequías; pero lo es por los temblores de tierra después de los cuales se las ha visto unas veces disminuir y otras crecer.

1150. **Distribución de las aguas en la superficie del globo.** — La distribución de las aguas en la superficie del globo ejerce una gran influencia sobre los climas. Las aguas presentan una superficie mucho mayor que la de los continentes y su distribución es muy desigual en los dos hemisferios. La superficie del globo, en miriámetros cuadrados, es de 5.100.000; de ellos los lagos y los mares ocupan 3.700.000 miriámetros cuadrados, quedando 1.400.000 para los continentes y las islas; es decir, que la superficie de las aguas es unas tres veces mayor que la superficie de las tierras. En el hemisferio austral, la superficie de los mares es mayor que en el hemisferio boreal en la proporción de 13 á 9.

La profundidad de los mares varía mucho. La sonda encuentra el fondo, en general, á 300 ó 400 metros; pero en alta mar baja hasta 9000 metros, que es la mayor profundidad observada. Según esos números, la masa total de las aguas, en la superficie del globo, no es superior á la de una capa líquida que tuviese 1000 metros de altura y que envolviese toda la tierra.

CAPÍTULO III

PREVISIÓN DEL TIEMPO.

1151. **Observaciones meteorológicas.** — Desde fines del siglo último, Borda, Lavoisier y Laplace adivinaron la posibilidad de la previsión, del tiempo en breve plazo por la observación de los fenómenos meteorológicos. Más tarde, Humboldt efectuó estudios encaminados á ese fin y lo mismo hicieron otros físicos, pero sobre todo en los últimos treinta años ha sido cuando el teniente Maury, de la marina norte-americana y el contralmirante Fitz-Roy, de la marina inglesa, han hecho ver la importancia de las observaciones meteorológicas continuas y combinadas, en todos los puntos del globo. Posteriormente se ha establecido una vasta red de observatorios meteorológicos unidos entre sí por medio de hilos telegráficos, de tal manera que hoy un mismo observatorio puede seguir simultáneamente sobre una inmensa parte del globo, las grandes corrientes de la atmósfera, y prever con algunos días de anticipación los países hacia los cuales se dirigen.

1152. **Signos del tiempo.** — Los *signos* ó *pronósticos del tiempo* son: la dirección y la fuerza del viento á diversas alturas, la elevación del mercurio en el barómetro, la temperatura del aire, su estado higrométrico, el aspecto del cielo, y por último, los movimientos de la aguja imantada.

Observados aisladamente y en una misma localidad, esos signos serían inciertos; únicamente efectuando observaciones simultáneas en una región extensa es como se pueden llegar á obtener resultados que merezcan confianza. Los signos que se deben consultar principalmente son la dirección del viento y la altura del barómetro.

1153. **Pronósticos sacados de los vientos y de los torbellinos.** — El estudio de la fuerza y de la dirección de los vientos es uno de los más importantes para los pronósticos del tiempo; esa es la base de las indicaciones suministradas por los observatorios.

Se sabe que la dirección de los vientos es determida por las veletas; pero éstas no dan más que la dirección en la superficie del suelo. Sólo las nubes y los globos marcan la dirección en las altas regiones, y al mismo tiempo la velocidad. Hay que observar, sin embargo, que la velocidad aparente de las nubes es tanto

más pequeña cuanto más elevadas se hallan, y que su dirección precede á menudo á la que dan las veletas.

Limitando aquí á Europa y sobre todo á Francia el estudio de la influencia de los vientos, observemos que además de las grandes corrientes ecuatoriales y polares estudiadas antes (1148), existe en el Atlántico del norte una vasta corriente aérea que sopla desde América hacia Europa, viniendo á parar al norte de las Islas Británicas donde se transforma en viento del noroeste y en viento del norte, á medida que se difunde por el continente. Su velocidad media es de 36 kilómetros por hora, pero varía con las estaciones.

Por efecto del encuentro de las corrientes ecuatoriales con la corriente atlántica norte, se producen casi de una manera constante, en la masa de esta última, movimientos giratorios denominados *torbellinos*, y que, desviándose hacia el sur con la corriente atlántica, se dejan sentir desde el norte de la Noruega hasta en las costas de Portugal.

Por efecto del movimiento giratorio, los torbellinos aspiran el aire frío de las altas regiones de la atmósfera, y como este aire condensa los vapores contenidos en la corriente ecuatorial, resulta que los torbellinos se presentan siempre acompañados de lluvia. Un torbellino aislado dura poco y por tanto lo mismo ocurre con la lluvia que acarrea, pero si se suceden varios torbellinos sin interrupción, lo que ocurre á menudo, se tienen lluvias prolongadas.

En la Europa occidental, son principalmente la corriente del Atlántico y los torbellinos que en ella se forman, las causas que producen los cambios atmosféricos, y ellas son las que dan origen á las borrascas y tempestades tan frecuentes en invierno en las costas del canal de la Mancha. Por eso es por lo que el arte de la previsión del tiempo sobre todo para el norte y el oeste de Francia, consiste en seguir de una manera continua la marcha de esas grandes perturbaciones atmosféricas que ocurren en el mar del Norte y en el Báltico.

1154. **Pronósticos que suministra la altura del barómetro.** — 1°. *Variaciones normales de la altura barométrica.* — Cuando se observa el barómetro durante varios días, se observa que su altura cambia en cada lugar, no sólo de un día á otro sino en uno mismo.

La *amplitud de las variaciones*, es decir, la diferencia media entre la mayor y la menor altura, no es siempre la misma, sino que aumenta del ecuador hacia los polos. Las variaciones máximas, excepto en casos extraordinarios, son de 6 milímetros bajo el ecuador, de 30 bajo el trópico de Cáncer, de 40 en Francia, en la latitud media, y de 60 á 25° del polo. Por fin, las variaciones mayores ocurren en invierno.

Llámase *altura media diurna* al número que se obtiene haciendo la suma de veinticuatro observaciones sucesivas del barómetro, tomadas de hora en hora, y dividiendo este número por 24. Ramond ha observado que *en la latitud de Francia la altura del barómetro á las doce de la mañana es sensiblemente igual á la media del día.*

La *altura media mensual* se obtiene sumando las alturas medias diurnas durante un mes, y dividiendo la suma por 30.

Por fin, la *altura media del año* se determina sumando las alturas medias de cada día durante un año y dividiendo la suma por 365.

Se ha descubierto que en cada lugar *la media anual es constante*, pero que varía de un punto á otro. Si se reducen al nivel del mar estas medias anuales, se pone de manifiesto una variación debida exclusivamente á la latitud. Bajo el ecuador, la media anual al nivel de los mares, es 0,758 m. Aumenta á partir de ese círculo, y á las latitudes de 30 á 40 grados alcanza un máximum de 0,763 m. Disminuye en las latitudes más altas, y en París se reduce á 0,7568 m.

La *altura media general al nivel de los mares* es de 0,761 m.

Las medias mensuales no son constantes en un mismo lugar; sino que son mayores en invierno que en verano. Esta es consecuencia del enfriamiento de la atmósfera.

Cuanto á las observaciones barométricas efectuadas en un mismo día, presentan dos clases de variaciones: 1°. las *variaciones accidentales*, que no tienen en su marcha ninguna regularidad, y que dependen de las estaciones, de la dirección de los vientos y de la posición geográfica: estas son las observadas principal y casi exclusivamente en los climas templados: 2°. las *variaciones diurnas*, que se producen periódicamente á ciertas horas del día.

En el ecuador y en las regiones intertropicales no se observan variaciones accidentales; pero las diurnas se producen allí con tal regularidad, que *un barómetro puede servir de reloj*. Según Humboldt, el barómetro baja desde mediodía hasta las cuatro de la tarde próximamente: *entonces alcanza un mínimum*, volviendo luego á subir, para *llegar á un máximum* á eso de las diez de la noche; después baja otra vez *hasta un segundo mínimum*, que alcanza á las cuatro de la mañana; por fin, vuelve á subir y *alcanza un segundo máximum* á eso de las diez. La amplitud de la oscilación nocturna es de 0,84 mm, mientras que la diurna es mucho mayor, pues llega hasta 2,55 mm.

También en las zonas templadas hay variaciones diurnas; pero son más difíciles de observar que en el ecuador porque continuamente las velan las variaciones accidentales. Sin embargo, se las ha puesto de manifiesto comparando gran número de medias de observaciones hechas á las diferentes horas del día.

Las horas de las máximas y de las mínimas de las variaciones diurnas parecen ser las mismas en todos los países, con independencia de la latitud; pero cambian un poco con las estaciones.

2°. *Aplicación de las indicaciones barométricas.* — Ya se ha visto la relación que existe entre la altura del mercurio en el barómetro y el buen ó mal tiempo (155), relación que hace del barómetro el instrumento más precioso conocido para la previsión del tiempo; pues la alza ó la baja no se verifica en los momentos de los cambios de tiempo, sino que los precede cuarenta y ocho horas y aun más.

Para sacar del barómetro todo el partido que puede dar, hay que tener en cuenta la altura del lugar donde se observa, puesto que la elevación media del aparato, que es de 761 milímetros al nivel del mar, disminuye á medida que se va subiendo. Además, debe tenerse en cuenta el movimiento ascendente ó descendente del mercurio. En efecto, si se lee, pongamos por ejemplo, la altura de 750 milímetros, no tiene la misma significación si sucede á 745 que cuando sigue á 755; en el primer caso, el barómetro marcha hacia el buen tiempo; en el segundo hacia el malo.

La velocidad y la dirección del viento tienen también una gran influencia sobre la altura del barómetro. Bajo el ecuador, donde el aire está animado de un movimiento ascendente, la presión es débil; en los trópicos, donde la corriente de aire baja en vez de subir, su velocidad adquirida empuja al mercurio y lo hace elevarse. En fin, los movimientos giratorios estudiados antes de ahora con el nombre de torbellinos son siempre precedidos y seguidos de un alza considerable, mientras que en su parte central se observa una baja tanto más pronunciada cuanto más rápido es el movimiento giratorio y cuanta mayor extensión de la tierra comprende.

Además de las variaciones de presión atmosférica que resultan de los cambios de temperatura, la altura del barómetro se halla, pues, sometida á numerosas causas accidentales. Sea lo que fuere, *un descenso considerable es siempre el pronóstico de una grave perturbación atmosférica.* Sin embargo, también se presentan el buen tiempo y la calma cuando el barómetro está bajo, pero entonces duran poco.

El barómetro puede elevarse con todos los vientos; pero las mayores alturas medias se observan cuando reina el del norte y las más pequeñas cuando sopla el del sur. Por último, todas las variaciones bruscas del barómetro, en un sentido ó en otro, son de corta duración, y anuncian, en general, un mal tiempo.

La observación del barómetro, no es útil solamente á los marinos; también lo es á los cultivadores. Para los primeros, lo que importa prever es la dirección y la fuerza del viento, para los segundos el estado del cielo, es decir, la probabilidad de sequía ó de lluvia. Es, pues, de desear que el barómetro penetre en los campos. « Un día llegará, dice Marié-Davy, en el que cada pueblecillo tendrá su barómetro municipal como tiene hoy su reloj, y en que el cultivador lo consultará al volver á su casa ó antes de dirigirse á su trabajo. »

1155. **Pronósticos sacados del termómetro y del higrómetro.** — Los pronósticos sacados de estos instrumentos están muy lejos de valer lo que los del barómetro y a veleta. Sin embargo, sus indicaciones no son de despreciar. Por ejemplo, en invierno, soplando el viento de entre el norte y el este, si el termómetro marca una temperatura algo inferior á cero, y si el higrómetro señala humedad, hay grandes probabilidades de que nieve. En verano, cuando la baja del barómetro

coincide con un calor sofocante, y que al mismo tiempo el higrómetro señala humedad, viéndose cúmulus en el horizonte, una tempestad es inminente.

1156. **Pronósticos sacados del movimiento de la aguja imantada.**— Con arreglo á las observaciones de M. Marié-Davy, la brújula debe ser colocada entre los instrumentos á propósito para dar indicaciones útiles sobre las probabilidades de los cambios de tiempo. He aquí, en efecto, lo que dice ese sabio en el *Annuaire météorologique* de 1876, página 179: « Del estudio que hemos comenzado con M. Descroix, relativo á la aguja imantada, resulta ya que las perturbaciones, ó las anomalías más pequeñas observadas en la declinación, acusan casi siempre, y varios días de antemano, el paso de una borrasca un poco fuerte por el noroeste del Atlántico, ó la llegada de los vientos lluviosos. Así se puede, por tanto, estar en guardia, pidiendo á otros signos indicaciones sobre la marcha que seguirá la tempestad ó acerca de la región de Europa por la cual se extenderán las lluvias. »

1157. **Pronósticos suministrados por el espectroscopio.** — M. Piazzi Smyth, de Edimburgo, ha reconocido, observando la atmósfera con el espectroscopio, que en el espectro de la parte baja del cielo existe una banda particular que es, cuando se presenta, un pronóstico de lluvia todavía más cierto que las indicaciones del barómetro. El sabio astrónomo ha efectuado esa observación por primera vez en Palermo, en 1872, Después lo ha repetido en Francia y en Edimburgo. M. Smyth cree que el espectroscopio es eficaz para anunciar la lluvia sobre todo en verano; pero en invierno prefiere el barómetro.

PROBLEMAS DE FÍSICA

CON SOLUCIONES

DADOS COMO TEMAS DE COMPOSICIÓN EN LA FACULTAD DE CIENCIAS DE PARÍS Y DE PROVINCIAS.

Objeto y resolución de los problemas de física. — Los problemas de física propuestos en los exámenes son, en general, verdaderos problemas de álgebra, en los cuales una ley física enlaza las cantidades conocidas á la incógnita.

Sea que los datos de un problema estén representados por letras ó por números, su resolución se compone siempre de dos operaciones muy distintas : 1° *el planteamiento del problema*, es decir, la traducción en ecuación de la relación existente entre la incógnita del problema y las cantidades conocidas ; 2° *la resolución de la ecuación*.

La segunda operación, completamente algebraica, exige el conocimiento de las operaciones y de las reglas algebraicas. El planteamiento reclama ante todo el conocimiento de las leyes de la física. Conocido el principio de física del cual es el problema una aplicación, no habrá más que aplicar la regla general de Lacroix para el planteamiento de los problemas de álgebra :

Representar la cantidad que se busca por una letra, y luego, razonando respecto de esa letra como si la cantidad que representa fuese conocida, indicar sucesivamente, con ella y con las cantidades conocidas del problema, la misma serie de operaciones que habría que efectuar para comprobar la incógnita, si ésta estuviese ya despejada.

Observación. — Conviene no reemplazar las letras por sus valores numéricos correspondientes sino en el resultado final.

GRAVEDAD, GRAVITACIÓN UNIVERSAL.

I. — ¿ Durante cuánto tiempo debe caer un cuerpo, en el vacío, para adquirir en París una velocidad de 600 metros, que es la de una bala de cañón ?

Solución : $t = 61{,}16$ s.

II. — ¿ Cuál es el tiempo necesario á un cuerpo para caer, en el vacío, desde una altura de 100 metros ?

Solución : $t = 14{,}28$ s.

III. — Si se lanza un proyectil verticalmente de abajo arriba en el vacío, con una velocidad inicial de 245,22 m, se pregunta al cabo de cuánto tiempo se detendrá el móvil para caer, y á qué altura se elevará.

Sean a la velocidad inicial impresa al móvil y t la duración de la ascensión; la gravedad, actuando durante ese tiempo como fuerza retardatriz, disminuye la velocidad a en una cantidad igual á g en un segundo, y en una cantidad gt al cabo de t segundos ; se tiene, pues, en el momento en que el cuerpo se para

$$gt = a, \qquad \text{de donde} \qquad t = \frac{a}{g} = \frac{245{,}22}{9{,}8088} = 25 \text{ s}.$$

Para calcular la altura á que se eleva el móvil, observemos que, como durante

su ascensión, la gravedad le roba gradualmente la velocidad que le comunicaría en tiempo igual si en vez de subir cayera, es preciso que el cuerpo tarde en elevarse á su mayor altura e precisamente el tiempo que tardaría en bajar de ella. Luego, la altura de ascensión puede calcularse por la fórmula $e = \frac{1}{2} g t^2$.

Solución : $t = 25$ s.
$h = 306522$ cm.

IV. — ¿ Cuál es el esfuerzo necesario para arrastrar un peso de 2500 kilogramos, haciendo abstracción del rozamiento, á lo largo de un plano inclinado cuya longitud AB sea igual á 1000 metros, y cuya altura BC llegue á 5 metros?

Solución : $f = 12{,}500$ kg.

V. — Se supone que un hombre levanta á la vez 125 balas de cañón de 2 kilogramos de peso; se pregunta cuál sería el número de balas de esa clase que podría levantar, desplegando la misma fuerza muscular, si la tierra tuviese el volumen de la luna, siendo iguales las restantes condiciones. Tomando como unidad el radio de la tierra, se tomará el de la luna igual á 0,27234 y se despreciará el aplanamiento de ambos cuerpos en sus polos.

Solución : $n = 459$ balas.

HIDROSTÁTICA, CUERPOS FLOTANTES Y PESOS ESPECÍFICOS.

VI. — La fuerza con que se hace marchar una prensa hidráulica es de 20 kilogramos; el brazo de palanca sobre que esa fuerza actúa es igual á 5 veces el de la resistencia; por último la superficie del émbolo grande equivale á 70 veces la del pequeño. Se pregunta la presión transmitida sobre el émbolo grande.

Solución : $f = 7000$ kg.

VII. — Una de las ramas de un sifón se encuentra llena de mercurio á una altura de 17,5 cm, y la otra de un líquido distinto á una altura de 42 cm; estas dos columnas se equilibran entre sí. Se pregunta la densidad del segundo líquido respecto del mercurio y respecto del agua. La densidad del mercurio es 13,6

Solución : $n = 0{,}416$.
$n' = 5{,}666$.

VIII. — Dado un cuerpo A, que pesa en el aire 7,35g, en el agua 5,17g, y en otro líquido B, 6,35g, sacar de esos datos la densidad del cuerpo A y la del líquido B.

Según el enunciado, el peso del cuerpo A pierde en el agua $7{,}55 - 5{,}17 = 2{,}38$g; ese es el peso del agua desalojada. En el líquido B, el cuerpo pierde $7{,}55 - 6.35 = 1{,}20$g; ese el peso del líquido B bajo el mismo volumen que el del cuerpo y del agua. Luego, el peso específico de A es $\frac{755}{238} = 3{,}172$ y el de B. $\frac{120}{238} = 0.504$.

Solución : $n_A = 3{,}172$.
$n_B = 0{,}504$.

IX. — Se tiene un cubo de plomo de cuatro centímetros de lado que se desea sostener en el agua suspendiéndolo de una esfera de corcho. ¿ Qué diámetro debe tener ésta para que su empuje de abajo arriba equilibre al peso del cubo de plomo, siendo 11.35 el peso específico de este cuerpo y 0.24 el del corcho?

Solución : $d = 11{,}85$ cm.

X. — Dos líquidos, cuyas densidades son 1 y $\frac{2}{3}$, se hallan colocados uno encima de otro y no se mezclan. Se sumerge en esos líquidos una esfera cuya densidad es $\frac{3}{4}$. Se pregunta, en el caso del equilibrio de la esfera, la relación de los segmentos que estarán sumergidos en los dos líquidos.

Solución : $V = 3\,V'$

XI. — Un pedazo de madera, cuya densidad es 0,729, tiene la forma de un cono recto. Se le hace flotar en el agua, de manera que su eje sea vertical. Poniendo primeramente el vértice hacia abajo, y luego el vértice hacia arriba, se pregunta qué fracción de la altura del cono se hundirá en cada caso.

Solución : $n_1 = 0{,}9$ y $n_2 = 0{,}647$.

XII. — Un cilindro de madera de haya flota horizontalmente sobre agua (fig. 1018); se pregunta la relación del volumen sumergido al volumen que sobrenada, sabiendo que el peso específico del haya es 0,852, y que el del agua es 1.

Fig. 1018.

Como los dos volúmenes cuyo cociente se busca tienen la misma altura h, sean S y S' los segmentos de círculo que les sirven de base, encontrándose sumergido el segmento S y sobrenadando el segmento S'.

El volumen sumergido es Sh, el que sobrenada $S'h$, y el volumen total del cilindro es $(S + S')\,h$. El peso del cilindro es, pues $(S + S')\,h \times 0{,}852$, y el del agua desalojada Sh; luego $(S + S')\,h \times 0{,}852 = Sh$.

Solución : $\frac{S'}{S} = 0{,}173$.

XIII. — Con oro, cuya densidad es 19,362, se fabrican hojas que tienen un diez milésimo de milímetro de grueso; ¿ qué superficie se podría cubrir con 10 gramos de oro ?

Solución : $x = 5\ m^2\ 16\ dm^2\ 47\ cm^2$

XIV. — Un vaso de vino de Champagna, de orma cónica, tiene interiormente 6 cm de diámetro en el borde; se le ha llenado completamente de mercurio, de agua y de aceite, en proporción tal, que la capa formada por cada uno de esos líquidos tiene 5 cm de grueso. Se sabe que la densidad del mercurio es 13,596, la del aceite 0,915, y la del agua 1. Calcular el peso del mercurio, del agua y del aceite, despreciando la influencia de la temperatura sobre la densidad de esos líquidos (fig. 1019).

Fig. 1019.

Solución : peso del mercurio = 71,188 g.
— agua = 36,652 g.
— aceite = 91,027 g.

XV. — Las monedas actuales de diez céntimos pesan 10 g, y están compuestas de una aleación de 0,95 de cobre, 0,04 de estaño, y 0,01 de zinc; la densidad del cobre es 8,85, la del estaño 7,29, y la del zinc 7,12; ¿ cuántas piezas de dicha clase serán necesarias para suministrar el metal necesario á la fabricación de una esfera de la misma aleación de 25 cm de diámetro á cero?

Solución : $x = 7161{,}7$.

XVI. — Un vaso de forma cónica tiene 8 cm de diámetro en su boca y 12 cm de altura; está colocado á plomo y lleno de mercurio y de agua en tales proporciones que el peso del mercurio es el triple del peso del agua. La temperatura es cero, la densidad del mercurio 13,598, y la del agua 1. Se pregunta el grueso de cada capa líquida (fig. 1020).

Fig. 1020.

Solución : $y = 6{,}78$ cm y $H - y = 5{,}22$ cm.

XVII. — Siendo 7 el peso específico del zinc y 9 el del cobre, ¿ qué cantidades de zinc y de cobre es necesario tomar para constituir una aleación que pese 50 gramos y cuyo peso específico sea 8,2 (admitiendo que el volumen de la aleación sea exactamente la suma de los volúmenes de los metales aliados)?

Solución : $x = 17{,}07$ g ó $y = 32{,}93$ g.

XVIII. — ¿ Qué esfuerzo F se necesita para sostener una campana llena de mercurio é introducida en el mismo líquido, siendo su diámetro interior de 6 centímetros, su altura *ob* (fig. 1021) sobre el nivel del baño de 18 centímetros, y la altura del barómetro de 0,77 cm? (*Poblema del barógrafo*).

Fig. 1021.

En el exterior, esta campana soporta, de arriba abajo, una presión igual al peso de una columna de mercurio que tuviese por base la sección *cd* y por altura la del barómetro; por consiguiente, esta presión es igual á $\pi R^2 \times 0.77 \times 13,596$.

En el interior, soporta, de abajo arriba, una presión igual á la presión atmosférica, menos el peso de una columna de mercurio que tuviese por base la sección *cd* y por altura *ob*, es decir, que la presión de abajo arriba equivale á

$$\pi R^2 \times (0,77 - 0,18) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

El esfuerzo necesario para sostener la campana será pues, igual á la diferencia entre esas dos presiones; se tiene

$$\pi R^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,18 \times 13,596.$$

Haciendo R = 3 centímetros se halla F = 6,919 kg.

XIX. — ¿ Á qué altura se eleva el agua, al primer golpe de émbolo en el tubo de aspiración de una bomba, siendo 50 cm, el camino que recorre el émbolo, la altura del tubo de aspiración 6 metros, y su sección $\frac{1}{10}$ de la del pistón? Al principio de la experiencia, el aire en el tubo de aspiración se halla á una presión igual á la de 10 metros de agua.

Representando por 1 la sección del tubo, la del cuerpo de bomba es 10, y los volúmenes del tubo y del cuerpo de bomba son respectivamente 6 y 5. Luego, representando por x la altura á que se eleva el agua en el tubo, los volúmenes de aire en la bomba, antes y después de la ascensión del émbolo, son 6 á la presión 10, y $5 + 6 - x$ á la presión $10 - x$; de donde

$$6 \times 10 = (11 - x)(10 - x).$$

Resolviendo, se halla $x' = 18,26$ m y $x'' = 2,74$ m.

El primer valor es una *solución extraña* que no satisface evidentemente á la cuestión; luego la altura á que el agua se eleva es 2,74 m.

LEY DE MARIOTTE Y MEZCLA DE LOS GASES. — SOLUBILIDAD.

XX. — Un vaso que contiene 10 litros de agua es primeramente expuesto al contacto del oxígeno, á la presión 78 cm un tiempo suficiente para que el agua absorba toda la cantidad de ese gas que puede disolver; colocando luego ese mismo vaso en una atmósfera limitada de 100 litros de ácido carbónico, á la presión 72 cm, se pregunta cuáles serán los volúmenes de los dos gases disueltos en el agua cuando el equilibrio se haya establecido. El coeficiente de solubilidad del oxígeno es 0,042, y el del ácido carbónico 1.

El coeficiente de solubilidad del oxígeno es 0,042, por lo cual 10 litros de agua absorben $0^{lit}.42$ de ese gas. Ahora bien, ese gas, procediendo como si entuviese sólo en el espacio ocupado por el ácido carbónico, ocupa un volumen de $100^{lit}.42$, á saber, de 100 litros en estado gaseoso y de $0^{lit}.42$ en disolución en el agua. La tensión del oxígeno es, pues, $78 \times \frac{0.42}{100.42} = 0,326$ cm.

De la misma manera, como el coeficiente de solubilidad del ácido carbónico es 1, los diez litros de agua disuelven 10 litros de ese gas, y el volumen del gas pasa á ser 110 litros, 100 de ellos en estado gaseoso y 10 en disolución. La tensión es, por tanto

$$72 \times \frac{100}{110} = 65,454 \text{ cm};$$

de donde la presión total, después que se ha establecido el equilibro, es

$$0{,}326 + 65{,}454 = 65{,}780 \text{ cm.}$$

Luego, el volumen de oxígeno disuelto, referido á la presión 65,78 cm, es

$$0^{lit},42 \times \frac{0{,}326}{65{,}780} = 0^{lit},00208,$$

y el del ácido carbónico, á la misma presión, $10^{lit} \times \frac{65{,}4545}{65{,}780} = 9^{lit},95$.

Solución : V (oxígeno) = 0,00208 litro.
V (ácido carbónico) = 9,95 litros.

XXI. — En un recipiente de 3 litros se introducen : 1°. 2 litros de hidrógeno á la presión de 5 atmósferas ; 2°. 4 litros de ácido carbónico á la presión de 4 atmósferas ; 3°. 3 litros de nitrógeno á la presión de $\frac{1}{2}$ atmósfera. Se pregunta la presión final de la mezcla, supuesto que la temperatura sea constante durante la experiencia.

Solución : $x = 9^{atm} + \frac{1}{6}$.

PÉRDIDA DE PESO EN LOS GASES. — GLOBOS AEROSTÁTICOS.

XXII. — Para equilibrar el peso de un lingote de platino colocado en el platillo de una balanza, se ha puesto en el otro platillo un peso de 27 gramos de cobre amarillo. ¿ Cuánto hubiera sido necesario poner en el caso de haber hecho la pesada en el vacío ? — Se sabe que la densidad del platino es 21,5, la del cobre amarillo 8,3, y que el aire á 0° y á la presión 76 cm, condición en que se opera, pesa 770 veces menos que el agua.

Solución : $x = 26{,}996$ g.

XXIII. — Como la densidad del aire es 1, la del hidrógeno 0,069, la del ácido carbónico 1,524 á 0° y á esión 76 cm, un cuerpo en el ácido carbónico pierde 1,15 g de su peso ; se pregunta cuál seria su pérdida de peso en el aire y en el hidrógeno.

Se pregunta también : 1°. si la relación entre esas pérdidas de peso sigue siendo la misma á la temperatura de 200°, no cambiando la presión ; 2°. si ese cociente es el mismo á la presión de 30 atmósferas, siendo de 0° la temperatura.

Solución : pérdida de peso en el aire = 0,75 452 g.
— en el hidrógeno = 0,052 062 g.

El cociente ó relación de las pérdidas de peso en el ácido carbónico y en el hidrógeno no sigue siendo el mismo cuando la temperatura ó la presión cambian, porque esos dos gases no son igualmente dilatables ni igualmente compresibles.

XXIV. — Calcular la fuerza ascensional de un globo esférico de tafetán que pesa vacío 63,620 kg, y que está lleno de hidrógeno impuro, sabiendo que el metro cuadrado de tafetán barnizado pesa 0,250 kg, el metro cúbico de aire 1,300 kg, y el metro cubico de hidrógeno 0,100 kg.

Solución : $f = 394{,}426$ kg.

XXV. — Se tiene un globo aerostático esférico de 4 metros de diámetro ; se le llena de hidrógeno impuro, que pesa 100 gramos por metro cúbico ; el tafetán barnizado con que está hecha la envoltura, pesa 250 gramos el metro cuadrado. Se pregunta cuánto hidrógeno se necesita para llenarlo, y qué peso puede equilibrar ese aparato, sabiendo que el metro cúbico de aire pesa 1300 gramos.

Se tiene $V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3{,}1416 \times 8}{3} = 33{,}510 \text{ m}^3$

y $S = 4\pi R^2 = 4 \times 3{,}1416 \times 4 = 50{,}2655 \text{ m}^2$.

Por consiguiente, el peso del hidrógeno contenido en el globo es, según el enunciado, $100 \text{ g} \times 33{,}510 = 3{,}351$ kg,
y el de la envoltura igual á $250 \text{ g} \times 50{,}2656 = 12{,}566$ kg.

El peso total del globo, comprendiendo en él el del hidrógeno y el de la envoltura, es por tanto $3{,}351 + 12{,}566 = 15{,}917$ kg.

Pero el peso del aire desalojado por el globo, y en consecuencia, el empuje de abajo arriba es, según el enunciado

$$1{,}300 \times 33{,}510 = 43{,}563 \text{ kg.}$$

de donde resulta que el peso que el globo puede equilibrar es

$$43{,}563 - 15.917 = 27{,}646 \text{ kg.}$$

Solución : peso del hidrógeno $= 3{,}351$ kg.
fuerza ascensional ó peso total equilibrado $= 27{,}646$ kg.

MÁQUINAS NEUMÁTICAS Y MÁQUINAS DE COMPRESIÓN.

XXVI. — Sabiendo que la capacidad del cuerpo de bomba de una máquina neumática es $\frac{1}{3}$ de la capacidad del recipiente, calcular después de cuantos golpes de émbolo simples será la presión interior la 200ª parte de lo que era primitivamente.

De la fórmula general $H_n = H_0 \left(\frac{R}{R + C}\right)^n$,

se tiene pues $\frac{H_n}{H_0} = \frac{1}{200}$ y $\frac{R}{R + C} = \frac{R}{R\left(1 + \frac{1}{3}\right)} = \frac{3}{4}$.

De donde $\frac{1}{200} = \left(\frac{3}{4}\right)^n$.

Tomando los logaritmos, resulta $n = \frac{\log 200}{\log 4 - \log 3} = 18{,}4$,

Solución : $n = 18{,}4$.

XXVII. — Un manómetro de aire comprimido se encuentra dividido en 110 partes de igual capacidad; cuando la presión exterior es de 76 cm, el mercurio, en el interior del tubo y en la cubeta, se mantiene en el cero de la escala. Se coloca el manómetro debajo el recipiente de una máquina de comprimir el aire, y se ve que el mercurio se eleva hasta la 80ª división; midiendo entonces la altura del mercurio en el tubo, se halla que es de 45 cm: se pregunta la presión en la máquina (fig. 1022).

Fig. 1022.

Solución : presión $= 4^{\text{atm}} + \frac{1}{4}$.

XXVIII. — Se hace funcionar el émbolo de una máquina neumática; el recipiente tiene 7,53 litros de capacidad y está lleno de aire á la presión 76 cm y á la temperatura 0°. Se pregunta : 1°. el peso del aire cuando la presión se reduce á 2,1 cm; 2°. el peso del aire extraído por el émbolo; 3° el peso del aire que quedaría en la campana á la temperatura de 15°.

Solución : peso del aire á 2,1 cm $= 0{,}269$ g.
— extraído $= 9{,}467$ g.
— á 15° $= 0{,}255$ g.

XXIX. — La campana de una máquina neumática contiene 3,17 litros de aire; un barómetro que comunique con la parte superior de la campana marca cero

cuando ésta se halla en comunicación con la atmósfera (fig. 1023). Se cierra la campana y se hace funcionar la máqu na; el mercurio sube entonces en el barómetro 65 cm. Otro barómetro, colocado cerca de la máquina, ha marcado 76 cm durante toda la experiencia. Se pregunta el peso del aire que se ha retirado de la campana y el peso del que queda, siendo de cero la temperatura.

Solución : peso del aire que queda = 0,596 g.
peso del aire sacado = 3,525 g.

Fig. 1023.

ACÚSTICA.

XXX. — El ruido del cañón ha tardado 15 segundos en transmitirse de un punto á otro, siendo de 22° la temperatura; se pregunta la distancia entre esos dos lugares, sabiendo que la velocidad del sonido á cero es de 333 metros.

Solución : $x = 5190$ m.

XXXI. — Siendo 7,8 la densidad del hierro, y la del cobre 8,9, se pregunta cuál debe ser la relación entre los diámetros de los hilos cilíndricos, uno de hierro y el otro de cobre, de longitudes iguales é igualmente tensos, para que produzcan la misma nota cuando se les hace vibrar transversalmente.

Solución : $n = 1{,}068$.

XXXII. — Habiendo dejado caer una piedra en un pozo, el sonido que aquélla produce al chocar con el agua no se oye más que á los 3 segundos de haberla soltado, ¿ cuál es la profundidad del pozo sabiendo que el sonido recorre 337 metros por segundo?

Representemos por v la velocidad del sonido, por x la profundidad del pozo hasta el agua, y por T el tiempo que trascurre entre el principio de la caída y la percepción del sonido. De la fórmula $e = \frac{1}{2} g t^2$ se saca $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2x}{g}}$; ese es el tiempo que la piedra tarda en caer.

Para averiguar el tiempo que el sonido tarda en llegar hasta el experimentador, observemos que como el espacio que aquél recorre por segundo es v, se necesitarán, para el espacio x, tantos segundos como veces contiene x á v, es decir $\frac{x}{v}$.

Luego $\sqrt{\frac{2x}{g}} + \frac{x}{v} = T$, ó $\sqrt{\frac{2x}{g}} = T - \frac{v}{x}$; de donde $\frac{2x}{g} = T^2 - \frac{2Tx}{v} + \frac{x^2}{v^2}$, ó reduciendo, $gx^2 - 2v(v + gT)x + v^2 g T^2 = 0$.

Resolviendo, se halla $x = \frac{v}{g}\left\{ gT + v \pm \sqrt{v(2gT + v)} \right\}$.

Reemplazando v, g y T por sus valores, resulta

$$x = \frac{337}{9{,}81}\left\{ 9{,}81 \times 3 + 337 \pm \sqrt{337(2 \times 9{,}81 \times 3 + 337)} \right\};$$

de donde
$$x = \frac{337}{9{,}81}(366{,}43 \pm 365{,}24).$$

Lo que da las dos soluciones : $x' = 25\,134{,}9$ m y $x'' = 40{,}8$ m.

Observación. — La primera es inadmisible, pues representa un espacio mayor que el que recorre el sonido en 3 segundos. Es una *solución extraña.*

XXXIII. — ¿ Cuál debe ser la tensión en kilogramos de una cuerda de cobre de

50 cm de longitud y de 0,25 mm de radio para que vibre 800 veces por segundo? La densidad del cobre es 8,87.

Solución : $f = 28,3938$ kg.

XXXIV. — Se lanza horizontalmente un proyectil con una velocidad de 200 metros por segundo; 5 segundos después del instante de partida, se oye el ruido producido por el choque del proyectil contra el blanco. Siendo cero la temperatura, se pregunta á qué distancia del observador, colocado en el punto de salida, se halla el blanco.

Solución : $x = 624,5$ m.

XXXV. — Si un tubo abierto da como tercer armónico $ré_0$, ¿cuál es la longitud de ese tubo en metros, siendo de 10^0 la temperatura del aire?

Solución : $l = 2,295$ m.

XXXVI. — Se pregunta en qué punto de la escala musical se encuentra el armónico 5 cuando lo produce, á la temperatura de 10^0, un tubo cerrado de 3,23 m de longitud.

Solución : $n = 130,4$ (es la nota do_2).

XXXVII. — Un tubo abierto da un sonido de 100 vibraciones por segundo, cuando se introduce en él aire á 10^0; ¿cuál debería ser la temperatura del aire introducido para que el sonido que se obtiene fuera la quinta mayor del primero?

Se sabe que los dos sonidos que dan la quinta son entre sí como 3 es á 2. Por consiguiente, siendo 100 el sonido dado el sonido buscado es 150.

Sentado esto, como la fórmula de los tubos abiertos es $L = p \cdot \frac{v}{2n}$, *si se hace en ella* $p = 1$, *se halla, para el sonido fundamental,* $L = \frac{v}{2n}$; *de donde se deduce, para el primer sonido* $L = \frac{v'}{200}$, *y para el segundo,* $L = \frac{v''}{300}$, *siendo* v' *la velocidad del sonido á* 10^0, *y* v'' *su velocidad á* θ^0. *De esas dos igualdades se saca* $\frac{v'}{200} = \frac{v''}{300}$. *Ahora bien, se sabe que* $v' = v\sqrt{1 + 10\alpha}$ *y* $v'' = v\sqrt{1 + \alpha\theta}$. *Se tiene pues*

$$\frac{v\sqrt{1 + 10\alpha}}{220} = \frac{v\sqrt{1 + \alpha\theta}}{300}, \quad \text{ó} \quad \frac{1}{2}\sqrt{1 + 10\alpha} = \frac{1}{3}\sqrt{1 + \alpha\theta}:$$

elevando al cuadrado, y reduciendo, se halla en fin

$$9(1 + 10\alpha) = 4(1 + \alpha\theta), \quad \text{ó} \quad 5 + 90\alpha = 4\alpha\theta;$$

resolviendo esta última ecuación respecto de θ, *y reemplazando* α *por su valor* 0,00367, *se halla* $\theta = 368^0,6$.

XXXVIII. — Un tubo abierto y un burdón (tubo cerrado) tienen una longitud común de 2 metros; se pregunta: 1°. cuál es la relación musical que existe entre los segundos armónicos de esos tubos; 2° cuál es el número absoluto de vibraciones que caracteriza á uno ó á otro de esos tubos. — La temperatura es de 20^0, el coeficiente de dilatación del aire 0,00367, y la velocidad del sonido en el aire á cero 333 metros.

Solución : $n = \frac{6}{5}$ (*tercia menor*).

$n' = 258,7, \quad n'' = 215,6.$

ÓPTICA.

XXXIX. — Queriendo comparar la intensidad de una lámpara Cárcel á la de una bujía, por medio del fotómetro de Rumford (fig. 329), se halla que las sombras producidas sobre la pantalla parecen de la misma intensidad, cuando ha-

llándose la bujía á 2 metros de la pantalla, está la lámpara á 4,74 m. ¿ Cuál es la intensidad de la lámpara si se toma por unidad la de la bujía ?

Solución : $i = 5{,}617$.

XL. — Una lámpara y una bujía están distantes entre sí 3,15 m y siendo la intensidad de la luz de la bujía 1 á la unidad de distancia, la de la lámpara es 3,6 ; á qué distancia de la lámpara, en la línea recta que une las dos luces, se debe colocar una pantalla para que sea igualmente iluminada por ambas, sabiendo que la intensidad de una luz está en razón inversa del cuadrado de la distancia ?

Solución : $x' = 2{,}21$ m y $x'' = 5{,}45$ m.

Observación. — La primera distancia corresponde á un punto situado entre las dos luces; la segunda da un punto situado sobre la prolongación de la recta que las une.

XLI. — ¿ Cuál es la altura *mínima* que debe tener un espejo plano, colocado verticalmente, para que una persona puesta de pie delante del mismo se vea en él por reflexión de la cabeza á los pies ? Establecer la posición del espejo.

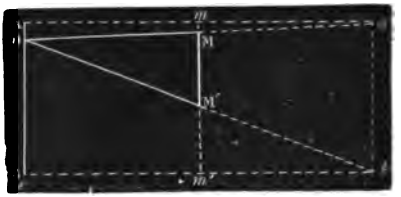


Fig. 1024.

Sean A *la parte superior de la cabeza ;* B *los pies,* O *los ojos, y mm' el plano del espejo* (fig. 1024). *Se sabe que las imágenes de los puntos* A *y* B *se forman en los puntos a y b, que les son simétricos* (352), *y que por consiguiente la imagen ab es de la misma magnitud que el objeto, y la distancia ma igual á* mA. *Ahora bien, como la vista percibe la imagen ab bajo el ángulo* aOb, *basta con que la altura del espejo sea igual á la porción de la recta mm' comprendida en ese ángulo, es decir, á* MM' ; *pero como en el triángulo* Oab, OM *es la mitad de* Oa, $MM' = \frac{ab}{2} = \frac{AB}{2}$; *luego, la altura del espejo debe ser por lo menos la mitad de la del objeto.*

En cuanto á la posición del espejo está determinada por los puntos en que las rectas Oa *y* Ob *cortan al plano mm'. El triángulo* ObB *hace ver que, siendo* Bm' *la mitad de* Bb, m'M' *es la mitad de* BO ; *es decir que el espejo debe hallarse colocado por encima del plano horizontal en que descansan los pies del observador, á una distancia igual á la semi-altura de la vista por encima del mismo plano. En otra posición cualquiera, más alta ó más baja, los puntos* A *y* B *no se hallarían simultáneamente en el campo del espejo.*

XLII. — Se coloca un círculo de superficie *s* á una distancia *p* delante de una lente convergente cuyas dos caras tienen como radios respectivos R y R'. Se trata de hallar la posición y la superficie de las imágenes producidas *por reflexión* sobre las dos caras de la lente y *por refracción* á través de la lente.

XLIII. — Un punto luminoso real P se encuentra colocado sobre el eje principal de una lente O cuyo diámetro es 2 *r*, y la distancia focal *f* ; en el foco principal por el lado opuesto de la lente se coloca una pantalla : ¿ Cuál es el radio ρ del círculo iluminado por los rayos emanados de P que han atravesado la lente ?

Discutir el valor de la incógnita según el valor de la distancia $p = PO$ del punto luminoso á la lente, y según que ésta es convergente ó divergente.

XLIV. — Un anteojo astronómico se dirige hacia un objeto muy distante; un observador coloca primero el ocular, cuya distancia focal es 1 cm, de modo que se forme la imagen virtual definitiva á 15 cm de esta lente. Después lo mueve hasta obtener una imagen definitiva real, que se forma también á 15 cm del ocular. ¿ Cuáles son el sentido y la magnitud del movimiento que ha sufrido el ocular entre las dos experiencias ?

¿ Cuál es la relación en que están las magnitudes lineales de las imágenes definitivas así obtenidas ?

XLV. — Dos lentes delgadas convergentes, de idéntica distancia focal, están colocadas á 1 m una de otra, de manera que sus ejes principales coincidan. Hallándose un objeto situado á 1 m de la primera lente, el sistema suministra una imagen real del mismo situada á 3 m de la segunda lente. ¿ Cuál es la distancia focal de cada una de estas lentes?

ESCALAS TERMOMÉTRICAS.

XLVI. — ¿ Á qué temperatura marcan el mismo número de grados los termómetros centígrado y de Farenheit ?

Siendo x esta temperatura, se tiene $(x - 32) \times \frac{5}{9} = x$, *de donde* $x = -40^0$.

XLVII. — Se tienen dos termómetros de mercurio, construidos con el mismo vidrio ; el diámetro interior del depósito de uno de ellos es 0,75 cm, y el de su tubo 0,25 cm, el otro tiene una bola de 0,62 cm de diámetro, y un tubo de 0,15 cm de diámetro interior. Se pregunta cuál es la relación de longitud de un grado del primer termómetro á un grado del segundo.

Solución : $\frac{l}{l'} = 0{,}638$.

DILATACIÓN DE LOS SÓLIDOS.

XLVIII. — Se tiene una barra de 3 metros, de un metal cuyo coeficiente de dilatación es $\frac{1}{754}$; una barra de 5 metros, de otro metal, se dilata, para un mismo número de grados, tanto como la primera : hallar el coeficiente de dilatación de esta última.

Solución : $x = \frac{3}{3770}$.

XLIX. — Un areómetro de Farenheit pesa 80 g. Cuándo está cargado con 45 g, entra hasta el punto de referencia en un líquido cuya temperatura es de 20^0, y cuya densidad á la misma temperatura es 1,5. Se pregunta el volumen á 0^0 de la porción sumergida del instrumento.

El peso del líquido desalojado es 125 g, y su volumen á 20^0 es $\frac{P}{D} = \frac{125}{1{,}5}$.

Tal es, pues, á esta temperatura el volumen de la parte sumergida ; de donde el volumen á 0^0 es

$$\frac{125}{1{,}5} \times \frac{1}{1 + 0{,}00002584 \times 20} = 83{,}290 \text{ cm}^3.$$

Solución : $V_0 = 83{,}290$ cm³.

Observación. — *Se toma 0,00002584 por coeficiente de dilatación cúbica del vidrio.*

L. La dilatación del hierro para cada grado de elevación de temperatura es 0,0000122 de la longitud medida á cero. Se pregunta cuál será, á 60^0 la superficie de un disco circular de palastro que tiene, á cero, 2,75 m de diámetro ?

Solución : S = 5 m² 94 dm².

LI. — Una regla de platino de 2 metros de largo está dividida, en uno de sus extremos en cuartos de milímetro : una regla de cobre de 1,950 m aplicada encima de la anterior, á cero, se diferencia de ella en 0,050 m, es decir, en 200 divisiones de la regla de platino. Se pregunta cuál es la temperatura común á las dos reglas cuando se diferencian en 164 divisiones de la regla de platino, siendo 0,00000884 2, el coeficiente de dilatación del platino y el del cobre 0,00001718 2.

Solución : $\theta = 556^0$.

LII. — El cociente del peso específico del cobre á cero y el del agua á 4^0 es 8,88. El coeficiente de dilatación cúbica del cobre es $\frac{1}{58200}$, y la fracción que representa la dilatación total del agua, entre 4° y 15°, es $\frac{1}{1360}$. Sentado esto, se pregunta cuál es, á 15^0 el cociente de los pesos específicos de esos dos cuerpos.

Solución : $n = 8,94$.

LIII. — ¿ Cuánto se alargará, al pasar de -15^0 á $+30^0$, un alambre de hierro de 170 kilómetros? El coeficiente de dilatación del hierro es $\frac{1}{81900}$.

Solución : $l = 98,4$ m.

DILATACIÓN DE LOS LÍQUIDOS.

LIV. — Siendo 13,59 el peso específico del mercurio á cero, se pregunta cuál es á 85^0, el volumen de 30 kilogramos de dicho metal. Se tomará como coeficiente de dilatación del mercurio $\frac{1}{5550}$.

Solución : V = 2,241 litros.

LV. — Se sabe que en un termómetro de mercurio cada división es $\frac{1}{6480}$ de la capacidad del depósito hasta el cero de la graduación. Sentado esto, si se vacía ese termómetro y se introduce en él hasta cero, en el hielo fundente, un líquido cuyo coeficiente de dilatación absoluta sea $\frac{1}{2000}$, se pregunta hasta qué división se elevará ese líquido á 20^0, siendo $\frac{1}{38700}$ el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio.

Solución : $n = 61,45$.

LVI. — Una columna de agua de 1,55 m de altura y una columna de otro líquido de 3,17 m de altura, se equilibran en las ramas de un sifón, encontrándose ambas sustancias á la temperatura de 4^0; se pregunta cuál es la densidad del segundo líquido respecto del agua, y cuál sería la altura á que aquél subiría si su calor fuese elevado á 25^0, permaneciendo el del agua á 4^0 y siendo $\frac{1}{6000}$ el coeficiente de dilatación absoluta del líquido.

1ª. *Las alturas de las columnas líquidas que se equilibran se hallan en razón inversa de sus densidades ; se tiene, por tanto*

$$1^m,55 \times 1 = 3^m.17 \times d, \quad \textit{de donde} \quad d = 0,4889 \text{ á } 4^\circ.$$

2ª. *Representando por h la altura del mismo líquido á 25^0, por d su densidad á 4^0, y por d' su densidad á 25^0, se tiene*

$$[1] \qquad 3^m,17 \times d = h \times d' :$$

pero

$$d' = \frac{d}{1 + \frac{1}{6000} = 25}.$$

Llevando este valor á la igualdad [1], *resulta*

$$3^m,17 = \frac{h}{1 + \frac{25}{6000}}, \quad \textit{de donde} \quad h = 3^m,183.$$

Solución : densidad = 0,4889 á 4^0.
altura = 3,183 m.

LVII. — Un tubo cilíndrico de vidrio, cerrado en la parte inferior y lastrado con mercurio, se introduce en el agua á 4° los $\frac{3}{4}$ de su longitud; se pregunta cuánto entraría en el agua á 20°. Se sabe que de 4° á 20° el agua se dilata 0,00179 de su volumen, y se desprecia la dilatación del vidrio de 4° á 20°.

Solución : $x = 0,7513$.

LVIII. — Estando dividido en 180 partes de igual capacidad un tubo capilar, se halla que una columna de mercurio que ocupa 55 de esas divisiones pesa 1,2 g á cero. Esto sentado, queriendo hacer de ese tubo un termómetro, se pregunta cuál será el radio interior del depósito esférico que se debe soldar al tubo para que sus 180 divisiones comprendan 150° centígrados.

Solución : $x = 1,85$ cm.

DILATACIÓN DE LOS GASES.

LIX. — Calcular el peso P de nitrógeno que estaría contenido á 32 grados en un globo de vidrio cuyo volumen, á cero es, 12,3 l., siendo 0,003668 el coeficiente de dilatación del nitrógeno, el de dilatación lineal del vidrio 0,00000861, y el peso específico del nitrógeno 0,9714; se supone que la presión atmosférica es igual á 76 cm.

Solución : $x = 1,911$ g.

LX. — Se ha metido un barómetro en un ancho tubo que se cierra en seguida con la lámpara. La temperatura del tubo, en el momento de cerrarlo, es 13°, y la altura del barómetro 76 cm, Se pregunta, con aproximación de 0,001 á qué altura subirá el mercurio en el barómetro cuando el calor del aire en el tubo sea de 30°,

Solución : $x = 80,771$ cm.

LXI. — Un globo de vidrio de 5 litros de capacidad á 0° está lleno de ácido carbónico á 0° y á la presión 76 cm. Se calienta hasta 100° después de haberlo abierto para permitir la salida del gas. Siendo entonces la presión 75 cm, se pregunta el peso del ácido carbónico salido del globo.

Solución : $x = 2,678$ g.

LXII. — Una vejiga de paredes flexibles contiene 4 litros de aire á 30° y á la presión 76. Permaneciendo la misma la presión atmósferica, se pregunta cuál será el volumen de aire si se baja la vejiga á una profundidad de 100 metros en un lago cuya temperatura es de 4 grados.

Solución : V = 0, 352 l.

LXIII. — En un globo de vidrio cuya capacidad á 0° es 250 cm. cúbicos, se introduce cierta cantidad de aire seco capaz de ocupar 25 cm cúbicos á 0° y á la presión 76. Cerrando el globo y calentando hasta 100°, se pregunta la presión interior.

Solución : presión (en altura de mercurio) = 10,36 cm.

LVIV. — Un cuerpo pesado en el aire, á 0° y á la presión 76, pierde 6,327 g. de su peso. Se pregunta : 1°. el volumen del cuerpo; 2°. su pérdida de peso á 15° y á la presión 125 cm. — Se sabe que la densidad del aire respecto del agua es $\frac{1}{770}$, que su coeficiente de dilatación es 0,00367, y se desprecia la dilatación del cuerpo.

Solución : 1°. $V = 4,872$ dm³.
2°. $f = 9,86$ g.

LXV. — ¿Á qué temperatura pesa 1 gramo un litro de aire seco, bajo la presión 0,177 cm, siendo 0,00367 el coeficiente de dilatación del aire, y siendo 11,193 g el peso de un litro de aire seco á 0° y á la presión 177 cm?

Solución : $\theta = 84°$ C.

LXVI. — ¿Cuál es á 18°,8 la pérdida de peso en el aire de un cuerpo cuyo volumen á esa temperatura sea 5182 m cúbicos; y cuál sería á 25°,13 la pérdida de peso del mismo cuerpo, siendo $\frac{1}{2400}$ su coeficiente de dilatación?

Á 10°,8, *la pérdida de peso es* $\frac{1^{gr},293 \times 1000 \times 5152}{2 + 0,00367 \times 10,8} = 6445^{k},1.$

Á 25°,13, *el volumen del cuerpo es* $\frac{5182\left(1 + \frac{3 \times 25,13}{2400}\right)}{1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}}$ *y, por consiguiente su pérdida de peso es* $\frac{1^{gr},293 \times 1000 \times 5182\left(1 + \frac{3 \times 25,12}{2400}\right)}{(1 + 0,00367 \times 25,13\left(1 + \frac{3 \times 10,8}{2400}\right)} = 6242^{k},947.$

Solución : 1° f $18°,_8 = 6455,1$ kg.
2° f $25°,_{13} = 6242,947$ kg.

DENSIDADES DE LOS GASES.

LXVII. — Un globo vacío pesa 150,475 g, lleno de aire pesa 160,158 g, lleno de otro gás, 162,235 g. 1°. Siendo invariable la presión, se pregunta la densidad de ese gas respecto del aire; 2°. qué corrección habría habido que hacer, si la presión hubiese sido 75 cm durante la pesada del aire, y 77 cm durante la pesada del otro gas.

Solución : 1° Densidad del gas = 1,2145.
2° La corrección que hay que hacer es referir el peso del aire y el del gas á la presión 76 cm y la densidad buscada es 1,183.

LXVIII. — Un globo vacío pesa 137,435; lleno de aire pesa 145,237 g; lleno de otro gas 152,118 g. Se pregunta: 1°. la densidad del gas respecto del aire, cuando la presión y la temperatura permanecen invariables; 2°. la misma densidad en el caso de que la presión hubiese sido de 75 centímetros durante la pesada del aire y de 77 centímetros durante la pesada de otro gas; 3°. qué genero de corrección hubiera sido necesario efectuar, si la temperatura hubiese sido de 8° durante la pesada del aire y de 11° durante la del gas.

Solución : 1°. Densidad del gas = 1,8819.
2° Densidad (2° caso) = 1,833.
3° Habría que referir el peso de los gases á cero, multiplicando el peso del aire por $1 + 0,00367 \times 8$, y el del gas por $1 + 0,00367 \times 11$.

CALORES ESPECÍFICOS.

LXIX. — En 25,45 kg de agua á 12°,5 se introducen 6,17 kg de un cuerpo á la temperatura de 80°; la mezcla adquiere una temperatura de 14°,17, se pregunta cuál es el calor específico del cuerpo.

Solución: $x = 0,104$.

LXX. — La capacidad calorífica del oro es 0,0298, si se toma la del agua por unidad; se pregunta cuánto se necesitará de aquel metal á 45° para elevar de 12°,3 á 15°,7 la temperatura de 1,00058 kg de agua.

Solución; 3,896 kg.

LXXI. — Se tiene una esfera de platino de 5 cm de radio á 95°, y se la sumerge en 2 litros de agua á 4°; se pregunta la temperatura del líquido en el momento de establecerse el equilibrio. La capacidad calorífica del platino es 0,0324; su coeficiente de dilatación lineal es 0,000008812, y su densidad 22,07.

Sean V' el volumen de la esfera á 95°, V el volumen á cero, y P su peso ; se tiene $V' = V(1 + 3K\theta)$ *de donde* $V = \frac{V'}{1 + 3K\theta}$.

Ahora bien $$V' = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3{,}14159 \times 125^{cub}}{3} = 523^{cub},598;$$

de donde $$V = \frac{523{,}598}{1 + 0{,}00000842 \times 3 \times 95} = 522{,}282\ cm^3, \quad y \quad P = 11{,}56\ kg.$$

Por consiguiente, la masa de platino, al enfriarse de 95 á x grados, cede, con arreglo á la fórmula $m(\theta' - \theta)c$, *una cantidad de calor igual á* $11^k{,}526 \times (95 - x) \times 0{,}0324$, *y los dos litros de agua, calentándose de 4 á x grados, absorben* $2 \times (x - 4)$.

Se tiene pues $$2(x - 4) = 11{,}526 \times 0{,}0324\ (95 - x).$$

Solución : $\theta = 18^0{,}3$.

LXXII. — El calor específico del sulfuro de cobre es 0,1312; el del sulfuro de plata 0,0746. Una mezcla de esos dos cuerpos, elevada á 40° y sumergida en 6 kilogramos de agua á 7°,67 eleva la temperatura de esa masa líquida á 10°. ¿Qué cantidad de cada sulfuro contiene esa mezcla?

Solución : $x = 2$ kgr y $5 - x = 3$ kgr.

LXXIII. — En un vaso de vidrio que pesa 12 gramos y que contiene 15 cm de agua á 10°, se proyecta un pedazo de hierro cuyo peso es de 20 gramos y cuya temperatura es de 98°; la temperatura del agua sube entonces á 11°22; se pregunta el calor específico del hierro sabiendo que el del vidrio es 0,19768.

Solución : $x = 0{,}1135$.

LXXIV. — Una masa de platino que pesa 40 gramos, es introducida en un horno donde permanece un tiempo bastante largo para adquirir la temperatura del mismo; sacándola en seguida y sumergiéndola en una masa de agua cuyo peso es 84 gramos y la temperatura de 12°, se observa que el agua se calienta hasta 22°. Se pregunta la temperatura del horno, sabiendo que el calor específico del platino es 0,0243.

Solución : $\theta = 669^0{,}5$.

LXXV. — Habiendo practicado una cavidad en un pedazo de hielo, se introduce en ella una masa de estaño que pesa 55 gramos, y cuya temperatura ha sido elevada previamente á 100°. ¿Cuál será el peso de hielo fundido, sabiendo que el calor específico del estaño es 0,0562, y que el calor de fusión del hielo es 79?

Solución : $x = 3{,}9$ g.

LXXVI. — ¿Qué cantidad de hielo en peso, debe arrojarse dentro de 9 litros de agua para enfriarlos desde 20° á 5°?

Solución : $x = 1{,}607$ kg.

LXXVII. — ¿Cuál es el peso en vapor de agua, á 100°, necesario para al condensarse elevar la temperatura de 208 litros de agua desde 14° hasta 32°?

Solución : $x = 158$ kg.

LXXVIII. — En un primer vaso se tiene agua á 11°; en otro agua á 91°, cuántos kilogramos de ese líquido deben tomarse en cada uno de los vasos para formar un baño de 250 kgr. á 31°?

Solución : $x = 187{,}5$ kg.
$y = 62{,}5$ kg.

CALORES LATENTES.

LXXIX. — ¿ Cuántos kilogramos de hielo á cero se necesitan para llenar á 10^0 centígrados el agua contenida en un depósito de borde circular y de fondo horizontal, cuya circunferencia superior es de 8,30 m, la inferior de 6,15 m, y la altura de 1,76 m, hallándose el depósito lleno de agua hasta la mitad de su altura, y siendo de 30^0 la temperatura del agua?

Fig. 1025.

Sean R *el radio* OB (fig. 1025) *de la base superior, r el radio* CD *de la base inferior, r' el radio* IE, *y h la altura* IC *del líquido contenido en el depósito. Se tiene*

$$R = \frac{8,30}{2\pi} = 1,3210\ m, \qquad r = \frac{6,15}{2\pi} = 0,9788\ m \qquad IC = 0,88\ m,$$

y

$$r' = \frac{R + r}{2} = 1,1499\ m$$

Sentado esto, como el volumen V *del líquido es el de un cono truncado cuya altura sea h y los radios de cuyas bases son r y r', se tiene, con arreglo á un teorema de geometría*

$$V = \frac{\pi h}{3}(r'^2 + r^2 + rr') = 3,138\ 605\ m^3,$$

volumen que representa un peso de agua de 3 138,605 *kg.*

Sea actualmente x el peso de hielo necesario para enfriar esta masa de agua de 30 *á* 10^0. *Como se ha visto* (663) *que un kilogramo de agua al fundirse absorbe* 79 *unidades de calor, x kilogramos de hielo absorben* 79 *x, para dar x kilogramos de agua á cero. Ahora bien, con arreglo á los datos del problema, esta última masa, debiendo á su vez ser elevada á* 10^0, *absorbe, además, una cantidad de calor igual á* 10*x. Por otro lado, el calor cedido por el agua es igual á* 3138*k*,605 × (30—10), *ó* 62772,1. *Se tiene, pues, la igualdad.*

$$79\,x + 10\,x = 62772,1.$$

Solución : $x = 705,304$ kg.

LXXX. — Averiguar cuántos kilogramos de vapor de agua se necesitan para elevar un baño de 246 kgr de agua de 13 á 28^0, sabiendo que el calor latente del vapor de agua es 540.

Solución : $x = 6,029$ kg.

LXXXI. — Una cuba cilíndrica de fondo plano y horizontal, tiene, 1,30 m. de diámetro y 0,75 m. de altura interiormente; dicha cuba se encuentra á mitad llena de agua á 4^0 y ese líquido se calienta haciendo llegar á él vapor á 100^0 suministrado por 5,250 kg de agua. Se pregunta cuál será la temperatura del baño calentado de ese modo y cuál será su volumen. Se despreciará la temperatura del vaso y se tomará como coeficiente de dilatación del agua $\frac{1}{2200}$.

Solución : $\theta = 10^0,6$ C y V = 504,509 litros.

LXXXII. — Suponiendo igual á 540 el calor latente del vapor de agua, se pregunta á qué temperatura se elevarán 20 litros de agua á 4^0, condensando en ellos 1 kilogramo de vapor á 100^0 y á la presión $0^m,76$.

Solución : $\theta = 34^0,28$.

LXXXIII. — ¿ Cuántos kilogramos de hielo á cero se necesitan para liquidar y llevar á cero 25 kgr. de vapor, desprendidos de un aparato en que el termómetro marca 100^0 y el barómetro 76 cm. El calor de fusión del hielo es 79.

Solución : $x = 202,532$ kg.

LXXXIV. — 11 kilogramos de hielo á cero han sido mezclados con P kilogramos de agua á 45°; la mezcla ha tomado la temperatura de 12°; se pregunta el peso P.

Solución : $P = 30{,}333$ kg.

LXXXV. — ¿En qué proporciones hay que dividir 1 kgr. de agua á 50° para que el calor que una de las partes abandone al pasar al estado de hielo á cero fuese suficiente para transformar la otra en vapor á 100°, á la presión 76 cm.? — Calor de fusión del hielo 79,25, y calor de vaporización del agua 535.

Solución : $x = 0{,}819$ kg.
$1 - x = 0{,}181$ kg.

LXXXVI. — Se sabe (594) que, en condiciones elegidas á propósito, un cuerpo puede permanecer en estado líquido á temperaturas inferiores á la de su solidificación normal. Sentado esto, se pregunta cuántos grados por debajo del punto de su fusión hay que enfriar al fósforo líquido para que, por su solidificación brusca y completa, vuelva al punto de fusión. — Calor de fusión del fósforo 5,4; calor específico en las proximidades del punto de fusión 0,20.

Solución : $\theta = 27°$.

LXXXVII. — Se ha bajado la temperatura del fósforo líquido hasta 30°; en ese momento se determina en la masa un principio de solidificación. Se pregunta si la solidificación será completa, y, si no lo es, cuál será la porción del peso total que se solidificará. — El fósforo se funde á 44°,2: su calor de fusión es 5,4, y su calor específico, en el estado sólido ó líquido, en las proximidades de la fusión es 0,2.

Solución : $x = 0{,}525$.

LXXXVIII. — Un cuerpo sólido se funde á la temperatura de 44°. En tres experiencias sucesivas, se introducen en un calorímetro que contiene un gran exceso de hielo á 0° : 1° 100 g de cuerpo sólido á 40°; 2°. 100 g de cuerpo fundido á 50°; 3°. 100 gramos de cuerpo fundido á 30°.

Los pesos de hielo fundido en estos tres experimentos cuando se alcanza el equilibrio de temperatura, son respectivamente : 9,5 gr, 18,2 gr y 25,7 gr. Se pregunta cuáles son los calores específicos del cuerpo en estado sólido y en el líquido y cuál es su calor latente de fusión, sabiendo que el calor latente del hielo es de 80 calorías por gramo.

VAPORES.

LXXXIX. — En un vaso vacío, de 2,02 litros de capacidad, se ha introducido primeramente 1 litro de aire seco á la presión de 76 cm y luego agua en cantidad tal que, después de la evaporación, quedan 20 cm³ de la misma en estado líquido. Se desea saber la presión interior, suponiendo que la temperatura sea de 30° en el momento de la experiencia, y que la tensión máxima del vapor de agua, á esta temperatura, sea de 0,031 m.

Solución : $f = 0{,}411$ m.

XC. — Una cantidad determinada de aire pesa 5,2 g á la temperatura de 0° y á la presión de 76 cm. Se la calienta hasta 30° á la presión de 77 cm permitiéndole saturarse de vapor de agua. Se pregunta cuál será entonces el volumen que dicha masa de aire ocupará. La tensión máxima del vapor á 30° est de 3,15 cm y se tomará 1,3 g como peso del litro de aire seco á la temperatura de 0° y bajo la presión de 0m,76.

Solución : $V = 4{,}56$ litros.

XCI. — El peso de un litro de aire á cero y á la presión 0,76 cm es 1,293 g, y la densidad del vapor de agua, calculada respecto del aire es $\frac{5}{8}$. Sentado esto se pre-

gunta cuál es, á 30° y á la presión 77 cm, el peso de un metro cúbico de aire cuyo estado higrométrico es $\frac{3}{4}$, siendo 3, 15 cm la tensión máxima del vapor á 30°.

Solución : $x = 1166,6$ g.

XCII. — Se tienen 3 litros de aire á 30° y á la presión 75 cm, cuyo estado higrométrico es $\frac{3}{4}$. Se pregunta lo que ese volumen de aire será, á la misma temperatura y á la misma presión, si se le agita con ácido súlfurico concentrado, y cuál será el aumento de peso que tomará el ácido.

Solución : $v = 2,906$ litros.
$f = 0,067$ g.

XCIII. — Dados 6,85 litros de aire saturado de vapor de agua de 11° y á la presión 76,8 cm se pregunta cuál será el volumen de este aire si se le seca á la temperatura de 15° y á la presión 75 cm. Se sabe que á 11° la tensión del vapor en estado de saturación es 1,0074 cm.

Solución : $v = 7,02$ litros.

XCIV. — Á través de un tubo de forma de U que contiene piedra pómez sulfúrica se hace pasar un metro cúbico de aire á la temperatura de 15°. El tubo de forma de U, pesado antes y después de la experiencia, presenta, después del paso del aire, un exceso de peso de 3,95 g; se pregunta cuál es el peso higrométrico del aire. — Se sabe que la densidad del vapor de agua respecto del aire es $\frac{5}{8}$, y que la tensión máxima á 15° es 12,69 mm.

Solución : $x = 0,309$.

XCV. — Una marmita de Papin contiene 3,25 kg de agua á 142°. Abriendo la válvula, una porción del agua, se evaporiza y la otra se enfría hasta 100°. Se pregunta el peso de vapor producido, siendo 540 el calor de evaporación.

Solución : $x = 0,25$ kg.

XCVI. — Calcular el volumen de aire que, en el estado higrométrico 0,70, contiene 600 gramos de vapor á 30°, siendo la tensión máxima á esa temperatura 31,548 mm, y la densidad del vapor $\frac{5}{8}$.

Solución : V = 28 364 litros.

XCVII. — Se desea saber cuál será, á 0° y á la presión 76 cm el peso de un volumen de aire seco, sabiendo que ese volumen saturado, á 18° y á la presión 78 cm, pesa 16,25 g. — La fuerza elástica del vapor de agua á 18° es 15,35 mm, y su densidad es igual á $\frac{5}{8}$ de la del aire.

Solución : $x = 17$ g.

XCVIII. — La densidad del éter líquido á 0° es 0,75; la del éter gaseoso referida al aire 2,5. Se pregunta el grueso que debe tener á 0° una capa cilíndrica de éter para que, transformada en vapor á 38°, en un tubo de la misma sección y de 1 metro de largo, dé un vapor á la tensión de 70 cm. — El peso del litro de aire seco es 1,293 g, y el coeficiente de dilatación de los gases 0,00367; el éter entra en ebullición á 36°, y á la presión 76 cm.

Sean 100 cm² *la sección del tubo, y* x *el grueso de la capa de éter líquido; su peso, en gramos, es* $100 \times x \times 0,75$. *En cuanto al vapor, su volumen en litros es* 10, *y su peso es* $\frac{1,293 \times 10 \times 2,5 \times 70}{(1 + 0,00367 \times 39)\,76}$. *Igualando ese peso al primer peso* $100\,x \times 0,75$ *y resolviendo, se halla* $x = 3,5$ *mm.*

Solución : $x = 3,5$ mm.

XCIX. – Se ha enfriado de 30 á 10° un volumen de aire de 500 litros, saturado de humedad á la presión 76 cm. ¿Cuál es el peso del vapor condensado, y cuál es el volumen del aire enfriado á 10°, á la misma presión? — Densidad del vapor de agua $\frac{5}{8}$; tensión máxima á 30° 30,3 mm, á 10° 9,43 mm; peso de un litro de aire seco 1,293 g; coeficiente de dilatación de los gases $\frac{1}{273}$.

Solución : P = 10,1 g.
V = 454 litros.

C. — Un tubo barométrico, cuyo vértice se eleva á 76 centímetros por encima del nivel de la cubeta, que suponemos muy ancha, contiene aire seco que ocupa sobre el nivel del mercurio en el tubo una longitud de 10 cm.

Introdúcese en el tubo un líquido que se volatiliza enteramente y satura el espacio *e* ocupado finalmente por la mezcla de aire y su vapor.

Determinar x. La presión exterior está equilibrada por 76 cm. de mercurio, y la fuerza elástica máximum del vapor á la temperatura de la experiencia por 10 cm de mercurio.

PROBLEMAS DIVERSOS

RELATIVOS Á LAS UNIDADES C. G. S.

1°. Una fuerza es igual á 80 dinas en el sistema C. G. S.; ¿cuál será su valor numérico en el de Gauss, cuyas unidades fundamentales son el milímetro, la masa del miligramo y el segundo?

Solución : $x = 8 \times 10^5$.

2°. Se lanza una bala de cañón con una velocidad de 608 metros-segundo: tiene una masa de 100 kg. ¿Cuál es su energía cinética en ergs?

Solución : $x = 1{,}8 \times 10^{14}$ ergs.

3°. Calcular el peso específico, en dinas por centímetro cúbico, del aire seco á 0°, bajo una presión de 1,02 megadina.

Solución : $x = 1{,}27$.

4°. Calcular en dinas la presión normal en un lugar que se encuentre á los 50° 37′ 44″ de latitud y á 24 m sobre el nivel del mar.

Solución : $x = 1{,}01376 \times 10^6$.

5°. La tensión superficial del agua es igual á 77 dinas. ¿Cuál es el valor numérico x de esta tensión en miligramos por metro?

Solución : $x = 7{,}85$.

6°. Mercurio que cae de una altura de 2,225 m se calienta 6°1573, según MM. Cantoni y Gerosa. Deducir de esta experiencia el valor de E, tomando como capacidad calorífica del mercurio el número 0,0337. Calcular E en el sistema C. G. S.

Solución : $E = 4{,}15.10^{10}$.

7°. Una esfera de 25 cm de radio está en el potencial 10; un conductor elevado al potencial 6 es puesto en comunicación lejana con esta esfera, y adquiere un potencial 7; calcular la capacidad C del conductor.

Solución : C = 75.

8°. M. Tæpler fija una aguja imantada al fiel de una balanza orientada en el meridiano, primero verticalmente, por coincidir el centro del imán con el del

fiel, y después horizontalmente, y equilibra mediante una tara la acción de la tierra en ambos casos; entonces vuelve el imán punta por punta y observa que ha de añadirse un peso P en la primera experiencia, y P' en la segunda para restablecer la horizontalidad del fiel. Deducir de estas observaciones el valor de la inclinación, sabiendo que P = 0,181 gr y P' = 0,417 gr.

Solución : $x = 66^0 32' 12''$.

9°. Una máquina Carré carga en 100 vueltas de platillo una batería de $\frac{1}{10}$ de microfarad, con potencial de 2500 volts; ¿qué corriente puede alimentar con la velocidad de 5 vueltas por segundo y qué energía produce?

Solución : $x = 0{,}0000125$ ampères.
$y = 0{,}0312$ joules.

10°. ¿Cuánto zinc precisa quemar en una pila de Bunsen para producir 75 kgm por segundo durante una hora, esto es para desarrollar la potencia de un caballo en ese espacio de tiempo?

Solución : $x = 470$ gr.

11°. Un aficionado que dispone de 20 elementos Poggendorff ($E = 2^v,01$) desea saber cuántas lámparas de incandescencia podrá alimentar, siendo de 10 bujías, 40 volts, 0,6 ampères y 32 ohms de resistencia en caliente.

Solución : $x = 7$ lámparas.

12°. La corriente de cuatro elementos Daniell, de resistencia interior $r = 1{,}5$ ohms, montados en serie, atraviesa un baño de galvanoplastia que contiene sulfato de cobre de resistencia específica 19,10 : los eléctrodos, que son de platino, tienen 1500 cmq de superficie y están á la distancia de 3 centímetros; calcular el peso del depósito formado en 5 minutos.

Solución : $x = 0.0495$ gr.

13°. Calcular el campo producido en su centro por una corriente circular de intensidad I y de radio R.

La acción de cada elemento Δs tiene como valor en un polo + I situado en el centro.

$$\frac{I.\,\Delta_s}{R^2}.$$

Siendo las acciones normales al plano del círculo, se tiene para la acción total,

$$\frac{I}{R^2}\,\Sigma\,\Delta_s.$$

Pero $\Sigma\Delta s$ es la longitud $2\pi R$ de la circunferencia; luego el campo en el centro

$$H_1 = \frac{2\,\pi\,I}{R}.$$

14°. Un conductor de cobre de 100 km de longitud no debe presentar resistencia superior á 50 ohms; ¿cuáles serán su diámetro y su sección?

Solución : $x = 0{,}63$ cm.
$y = 0{,}3168$ cm².

15°. Un corta-circuito de seguridad, de metal fusible, debe interrumpir la corriente así que ésta llega á 20 ampères; ¿qué diámetro se le dará? Los corta-circuitos son alambres de plomo cuya sección se calcula á razón de 0,127 mm² por ampère.

Solución : $x = \sqrt[3]{\frac{I^2}{K^2}}$.

16°. Quieren transmitirse 100 caballos á 0,5 km de distancia; la generatriz de que se dispone tiene una fuerza electromotora de 2000 volts : se trata de calcular todos los elementos de la transmisión en las condiciones más ventajosas, sabiendo que la generatriz tiene 12 ohms de resistencia, y que la receptora es idéntica á ella.

Solución : potencia transportada $x = 36$ caballos [1].

17°. Dos aros tienen sus centros coincidiendo y sus planos perpendiculares. Los recorren corrientes sinusoidales del mismo período. Se pregunta :

1°. Cuál es el campo resultante en el centro.

2°. Cómo varía ese campo (campo magnético giratorio).

1. Véase A. Witz : *Ejercicios de física y aplicaciones.*

TABLAS DE NÚMEROS

ÚTILES PARA LA RESOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS [1].

Valores de la aceleración y de la longitud del péndulo.

LUGARES	LATITUD	g	l
Ecuador	0°,0'	978,10	99,103
Constantinopla	41,00	980,15	99,31
Latitud 45°	45,00	980,61	99,356
París	48,50	980,99	99,390
Greenwich	51,29	981,17	99,413
Berlín	52,30	981,25	99,422
Edimburgo	55,37	981,54	99,451
Aberdeen	57,90	981,64	99,466
Polo	90,00	983,11	99,610

Densidades de los gases y de los vapores á 0° C y á la presión de 10^6 dinas por cm² (1 *baria*).

GASES	DENSIDAD EN GRAMOS por dm³	VOLUMEN DE 1 GRAMO en cm³	MASA RELATIVA á la del aire
Aire	1,2579	783,8	1,00
Oxígeno	1,4107	708,9	1,11
Nitrógeno	1,2393	806,9	0,97
Hidrógeno	0,08837	11316,0	0,069
Ácido carbónico	1,9509	512,6	1,52
Óxido de carbono	1,2179	821,1	0,97
Gas de los pantanos	0,7173	1394,1	0,57
Cloro	3,0909	323,5	2,43
Protóxido de nitrógeno	1,9433	514,6	1,53
Bióxido de nitrógeno	1,3254	754,5	1,04
Ácido sulfuroso	2,6990	370,5	2,21
Cianógeno	2,2990	435,0	1,81
Gas olefiante	1,2529	789,1	0,99
Amoniaco	0,7594	1316,8	0,60
Vapor de agua	0,0800	»	0,62

Fórmula exacta para la reducción de las alturas barométricas á 0°.

$$h = H \cdot \frac{5550}{5550 + \theta} (1 + K\theta).$$

h, altura reducida; H, altura observada; θ, temperatura de la experiencia; K, coeficiente de dilatación lineal de la escala.

Para el latón . . . . . K = 0,0000188 por grado C.
Para el cristal . . . . . K = 0.0000076 —

1. Véase Hospitalier, *Formulaire de l'Électricien*, año 1894.

Puntos de fusión y de ebullición de los cuerpos usuales

(Los puntos de ebullición se establecen bajo la presión de 76 centímetros).

SUSTANCIAS	FUSIÓN	EBULLICIÓN
Ácido carbónico	»	— 78°
— esteárico	70°	»
— sulfuroso	— 79,2	— 10
Acero dulce	1450	»
— duro	1400	»
— al manganeso	1260	»
Alcohol absoluto	< — 90	78,3
Aluminio	625	»
Plata	945	»
Bencina	7	80,8
Manteca	30	»
Bronce	900	»
Cloruro de sodio (disolución saturada)	»	108,0
Cera amarilla	76,2	»
— blanca	68,7	»
Cobre	1054	»
Agua del mar	— 2,5	103,7
Esencia de trementina	— 10	156,8
Éter sulfúrico	— 32	35,5
Hierro	1500 á 1600	»
Fundición de hierro	1050 á 1200	»
— gris	1220	»
— blanca	1135	»
Aceite de linaza	— 20	387,5
Mercurio	— 39,5	358,0
Naftaleno	»	218,0
Oro á 900/1000	1180	»
Parafina	43,7	370,0
Fósforo	44,2	290,0
Platino	1775	»
Paladio	1500	»
Plomo	326	»
Azufre	114,5	448,0
Sulfato de potasa	1045	»
Sebo	33	»
Sulfuro de carbono	»	48,0
Zinc	415	1040,0

Calores específicos en calorías (g — d) por gramo.

Agua (definición)	1,0000	Mercurio	0,0319
Alcohol	0,5475	Nickel	0,1092
Azufre	0,1776	Oro	0,0324
Cobre	0,0952	Plata	0,0570
Estaño	0,0362	Platino	0,3240
Hielo	0,5040	Plomo	0,0314
Hierro	0,1138	Zinc	0,0956

Densidades en gramos-masa por centímetro cúbico á 0° C.

METALES		
Iridio	22	38
Platino	21 á	22
Oro	19 á	19,6
Plomo		11,4
Plata		10,5
Cobre martillado		8,9
— laminado		8,8
— fundido		8,6
Maillechort	8,3 á	8,62
Latón fundido	7,8 á	8,4
— en alambres		8,54
Acero	7,8 á	7,9
Hierro		7,8
Estaño	7,3 á	7,5
Zinc		7,19
Fundición		7,0
Aluminio laminado		2,67

MADERAS.		
Encina	0,61 á	1,17
Ébano	1,12 á	1,21
Corteza de alcornoque (corcho)		0,24
Chopo	0,39 á	0:51
Boj de Francia	0,91 á	0,93
— de Holanda		1,33

AISLADORES.		
Flint	3,0 á	3,5

AISLADORES (*continuación*).		
Crown		2,5
Vidrio verde		2,64
Pizarra		2,8
Mármol		2,7
Porcelana	2,15 á	2,3
Marfil		1,8
Alquitrán		1,02
Gutapercha	0,97 á	0,98
Caucho		0,93
Ebonita		1,15
Cera		0,96
Parafina		0,87

LÍQUIDOS.	
Mercurio	13,596
Agua de mar	1,026
Aceite de olivo	0,915
Alcohol puro	0,791
Éter	0,716

SUSTANCIAS DIVERSAS.		
Carbón Carré		1,62
— de retorta		1.91
Diamante		3,50
Coke	1.0 á	1,66
Hielo		0,92
Nieve no comprimida		0,10

Coeficientes de dilatación lineal de algunos sólidos para 1° entre 0° y 100°.

CUERPOS	COEFICIENTES	CUERPOS	COEFICIENTES
	0,0000	Hierro en alambres	14401
Acero	11500	Fundición	11100
— templado	12250	Hielo á — 27 á — 1	51813
Aluminio	22239	Mármol blanco	10720
Plata	19097	— negro	04260
Madera de pino	03520	Oro	15136
Ladrillos	05502	Platino	08842
Bronce	18492	Plomo	28484
Cobre amarillo (latón)	18782	Vidrio en tubos	08969
— rojo	17182	— en barras macizas	09220
Estaño	21730	— en flint	08167
Hierro	11821	Zinc	29680

Calor de fusión.

Agua	79,25	Azufre	9,37
Zinc	28,13	Fósforo	5,03
Estaño	14,25	Mercurio	2,82

Consumo y calor emitido por los principales iluminantes.

ILUMINANTES	CONSUMO HORARIO por mechero carcel	CALOR EMITIDO EN CALORÍAS (Kg, D) por carcel-hora	VOLUMEN DE ÁCIDO CARBÓNICO en litros
Mechero bujía de gas	200 l.	1040	140
Bujía de la Estrella.	70 gr.	700	39
Mechero moderador de gas . . .	127 l.	660	84
Mechero de gas, de tubo (gran consumo).	90 l.	468	61
Lámpara de aceite.	42 gr.	420	58,5
— de petróleo	39 gr.	390	48
— de incandescencia. . .	30 watts-hora	25	0

Cuerpos gaseosos (calores específicos á presión constante).

Aire.	0,2374	Amoniaco	0,5084
Oxígeno.	0,2175	Ácido carbónico.	0.2169
Hidrógeno.	0,4090	— sulfuroso	0.1544

Calor específico del aire á volumen constante. 0.17

Calores de vaporización, á la presión de 76 centímetros.

Agua	537	Ácido acético	102
Alcohol metílico.	264	Éter sulfúrico	91
— ordinario	208	Esencia de trementina.	69

Fuerza elástica del vapor de agua según Regnault.

TEMPERATURA	FUERZA ELÁSTICA en mm de mercurio	TEMPERATURA	FUERZA ELÁSTICA en mm de mercurio	TEMPERATURA	FUERZA ELÁSTICA en mm de mercurio
— 30°	0,386	48°	54,906	110°	1075,57
— 20	0,927	50	91,982	120	1491,28
— 10	2,093	60	148,791	130	2030,28
0	4,600	70	233,093	150	3581,23
10	9,165	80	354,643	200	11 688,96
20	17,391	90	525,450	230	20926,40
30	31,548	100	760,000	»	»

Fuerza elástica de los vapores de algunos líquidos.

TEMPERATURA	ALCOHOL	ÉTER	SULFURO DE CARBONO	CLOROFORMO
	mm	mm	mm	mm
— 20°	3,34	68,60	47,30	»
+ 10	24,23	286,83	198,46	»
30	78,52	634,80	434,62	247,51
50	219,90	1264,83	857,07	535,05
100	1697,55	4953,30	3325,15	2428,54
150	7318,40	»	9095,94	7280,62
165	»	»	»	9527,82

Resistencia de los conductores más usados á la temperatura de 0° C en unidades legales.

NATURALEZA DE LOS CONDUCTORES	RESISTENCIA ESPECÍFICA microhms-centímetros	RESISTENCIA DE 100 M de 1 milímetro de diámetro	AUMENTO DE RESISTENCIA por grado centig. hacia 20° C
Plata recocida	1,492	1,899	0,00377
— batida	1,620	2,062	0,00385
Cobre recocido	1,584	2,017	0,00388
— batido	1,621	2,063	0,00410
Aluminio recocido	2,889	3,679	0,00390
Zinc comprimido	5,580	7,105	0,00365
Platino recocido	8,981	11,435	0,00247
Hierro recocido	9,636	12,270	0,00500
Nickel recocido	12,356	15,730	0,00500
Ferro-Nickel recocido	78,300	99,694	0,00093
Estaño comprimido	13,103	16,680	0,00365
Plomo comprimido	19,465	24,780	0,00387
Bismuto comprimido	130,100	165,600	0,00354
Mercurio líquido	94,340	120,120	0,00072
Maillechort	20,760	26,430	0,00044

CONSTANTES ÚTILES

Radiante	$57^\circ\ 17'\ 44''$.
Valor del caballo-vapor en ergs	$7{,}357 \times 10^9$.
Joule	10^7 ergs.
Watt	10^7 ergs por segundo.
El caballo-vapor corresponde a	756 watts.
La caloría-gramo equivale á	$4{,}17 \times 10^7$ ergs ó 4,17 joules.
Valor del cociente v según M. Abraham (tesis de doctorado, 1892)	$v = 299{,}2 \times 10^8$ cent.-segundo.
En las aplicaciones numéricas se toma generalmente	$v = 3 \times 10^{10}$.

Expresión de una misma cantidad de energía W en los sistemas electrostáticos y magnéticos.

$$W = i^2 rt = I^2 Rt = eit = EIt = eq = EQ = e^2 c = E^2 C,$$

de donde se deduce

$$v = \sqrt{\frac{R}{2}} = \frac{i}{I} = \frac{E}{e} = \frac{q}{Q} = \sqrt{\frac{c}{C}};$$

por consiguiente

La unidad electro-magnética.	de cantidad de electricidad	$= v$	unidades electrostáticas.
	de corriente	$= v$	
	de fuerza electro-motora	$= \frac{1}{v}$	
	de capacidad	$= v^2$	
	de resistencia	$= \frac{1}{v^2}$	
	de masa magnética	$=$	

NOTA

Recomendamos á los estudiantes — según el ejemplo dado por la Academia de ciencias — que usen en la resolución de los problemas un sistema de notaciones único, conforme á los acuerdos y convenios reiterados de la Oficina Internacional de pesas y medidas, del Congreso do Electricistas de París (1881), del de Mecánica aplicada (1889), del 2º de Electricistas de París (1889) y por fin del de Electricistas de Francfort (1891). He aquí según M. Hospitalier (*Formulaire de l'Électricien*), un cuadro de esta notación metódica y racional que debería adoptarse, con exclusión de todas las demás, en los documentos oficiales, en las publicaciones de las imprentas nacionales y, generalmente, en todas las publicaciones científicas.

B.A.	Asociación Británica (British Association).
C	grado centígrado.
C.G.S.	centímetro-gramo-segundo.
A	aceleración.
C	capacidad.
E	fuerza electromotora.
H	intensidad del campo magnético.
I	intensidad.
L	longitud.
L_m	coeficiente de inducción mutua.
L^s	coeficiente de inducción sobre sí mismo (self-induction).
M	masa.
P	potencia.
Q	cantidad de electricidad.
R	resistencia.
T	tiempo.
V	volumen.
W	energía, trabajo, momento de un par.
c	centi.
cm^2	centímetro cuadrado.
cm^3	centímetro cúbico.
d	deci.
f.e.m.	fuerza electromotora.
f	franco.
g-d	gramo-grado (*degré*).
g	gramo.
h	hecto ú hora.
kg	kilogramo.
kgm	kilográmetro.
log	logaritmo decimal.
loge	logaritmo neperiano.
m	metro ó minuto.
m^2	metro cuadrado.
m^3	metro cúbico.
mg	miligramo.
mm	milimetro.
s	segundo.
d	diámetro.
e	base de los logaritmos neperianos. diferencia de potencial.
f	fuerza.
g	aceleración de la gravedad.
i	intensidad.
k	capacidad inductiva específica.
l	longitud.
m	polo magnético.
n	número abstracto.
r	resistencia interior.
s	sección.
t	tiempo
v	velocidad. razón de las unidades electrostáticas á las unidades electro-magnéticas.
α	resistencia eléctrica específica.
α, β	ángulos.
δ	desviación.
ε	elongación (distancia angular).
θ	temperatura.
μ	permeabilidad magnética.
σ	densidad eléctrica.
Φ	flujo de fuerza magnética.
ω	velocidad angular.
$\mathfrak{B}$	inducción magnética específica.
$\mathfrak{F}$	fuerza magneto-motora.
$\mathfrak{H}$	fuerza magnetizante.
$\mathfrak{I}$	intensidad de imantación.
$\mathfrak{M}$	momento magnético.
$\mathfrak{R}$	resistencia magnética.

ÍNDICE DE MATERIAS

LIBRO I

MATERIA, MOVIMIENTO Y FUERZAS.

Cap. I. — *Nociones preliminares* 1

Materia, cuerpo, propiedades de los cuerpos. — Fenómenos físicos y químicos 1

Objeto de la física 2

Método físico ó experimental. — Leyes físicas 2

Teorías físicas. — Antiguos fluidos imponderables. — Antiguos agentes físicos. — Física moderna 3

Divisiones de la obra 5

Cap. II. — *Propiedades generales de la materia* 5

Estados físicos de los cuerpos 5

Clasificación de las propiedades de la materia 6

Inercia 7

Extensión. — Impenetrabilidad 7

Compresibilidad 7

Divisibilidad 8

Átomos y moléculas 8

Poros moleculares. — Porosidad y permeabilidad 9

Cap. III. — Nociones de mécanica 10

Definiciones fundamentales y principios generales 10

Objeto de la Mecánica 10

Divisiones de la Mecánica racional 10

Cinemática 11

Definiciones preliminares 11

Movimiento uniforme 11

Movimiento variado 12

Movimiento rectilíneo uniformemente variado 13

Movimiento absoluto, movimiento relativo, movimiento aparente 14

Composición de los movimientos 14

Estática 15

Fuerzas. — Equilibrio. — Estática 15

Medida de las fuerzas. — Dinamómetros 15

Representación de las fuerzas 17

Resultante y componentes 18

Dinámica 18

Definiciones 18

Principio de la inercia 18

Principio del movimiento relativo 19

Principio de la igualdad entre la acción y la reacción 19

Masa 20

Trabajo mecánico de una fuerza constante en magnitud y en dirección 21

Fuerza viva, potencia viva 22

Teorema del trabajo ó de las fuerzas vivas 22

Transformación del trabajo en fuerza viva y de la fuerza viva en trabajo 23

Energía actual. — Energía potencial. — Energía total 24

Principio de la conservación de la energía 25

Unidades métricas de energía y de potencia 26

LIBRO II

GRAVEDAD.

Cap. I. — *Dirección y naturaleza de la gravedad* 28

Definición de la gravedad 28

Dirección de la gravedad. — Plomada 28

Vertical. — Horizontal y horizonte 29

Caracteres de la gravedad. — Definición

del peso y del centro de gravedad de los cuerpos 31

Cap. II. — *Leyes de la caida de los cuerpos. — Centro de gravedad. — Equilibrio de los sólidos pesados*... 32
Enunciado de las leyes..... 32
Demostración experimental de las leyes. 33
Plano inclinado..... 34
Máquina de Atwood..... 36
Aparato de Morin..... 41
Experiencias de MM. Cailletet y de Colardeau en la torre Eiffel..... 44
Centro de gravedad de los cuerpos homogéneos..... 46
Centro de gravedad de los sólidos geométricos..... 47
Centro de gravedad de las superficies y las líneas..... 48
Equilibrio de los cuerpos graves..... 49
Determinación empírica del centro de gravedad de los cuerpos sólidos..... 51

Cap. III. — *Determinación de la intensidad de la gravedad. — Péndulo. — Experiencias de Borda. — Aplicaciones del péndulo*..... 52
Métodos diversos para determinar *g*.. 52
Péndulo..... 52
Leyes experimentales del péndulo..... 54
Demostración experimental de las leyes del péndulo..... 56
Comparación del péndulo compuesto y del simple..... 57
Fórmula del péndulo compuesto. — Longitud del péndulo compuesto, longitud del péndulo simple isócrono..... 58
Quinta ley del péndulo. Ley de las intensidades..... 59
Longitud del péndulo simple isócrono: otra fórmula..... 60
Teorema de Huygens: Reciprocidad del eje de oscilación y del de suspensión. — Péndulos reversibles..... 61
Aplicación del péndulo al cálculo de *g*. 62
Experiencias de Borda..... 63
Experiencias del comandante Defforges. — Péndulo de inmersión y de cuchillas reversibles..... 68
Resultados de las diversas medidas de *g* en París..... 68
Variaciones de *g* y de L en la superficie del globo..... 69
Variaciones de *g* en lo interior del globo. 69
Origen de la gravedad..... 70
Aplicaciones del péndulo compuesto.... 71

Cap. IV. — *Medida de las magnitudes mecánicas y físicas. — Sistema de las unidades absolutas ó sistema C. G. S. — Instrumentos de precisión*..... 73
Definiciones generales..... 73
Ventajas generales de un sistema de medidas racionales..... 74
Insuficiencia del sistema métrico. — Necesidad de un sistema de medidas absolutas: sistema de Gauss y sistema C. G. S..... 75
Exposición del sistema C. G. S..... 75
Conversión de las medidas racionales en medidas absolutas: dimensiones y ecuaciones de dimensiones..... 78
Dimensiones y ecuaciones de las dimensiones de las principales unidades mecánicas derivadas..... 79

Medida de las magnitudes fundamentales..... 80
Generalidades sobre las medidas y los instrumentos de precisión..... 80
Reglas graduadas. — Metro-tipo..... 81
Vernier..... 82
Tornillo micrométrico..... 84
Esferómetro..... 84
Aplicación del tornillo micrométrico: aparato de Borda..... 86
Máquina de dividir..... 87
Catetómetro..... 88
Micrómetro ocular..... 90
Comparador..... 90
Medida de las masas, de las pesas y de las fuerzas..... 92
Definición y generalidades..... 92
Balanzas..... 93
Balanzas de precisión..... 98
Balanza de Collot..... 99
Diferentes métodos de pesada..... 102

LIBRO III

HIDROSTÁTICA.

Cap. I. — *Caracteres generales de los líquidos*..... 104
Hidrostática é hidrodinámica..... 104
Compresibilidad de los líquidos..... 104
Principio de igualdad de presión ó principio de Pascal..... 104
Generalización del principio de Pascal.. 105
Dirección de las presiones..... 106
Prensa hidráulica..... 106
Prensas de Desgoffe y de Cailletet..... 109

Cap. II. — Propiedades de los líquidos graves en equilibrio 109

Presiones sobre las paredes de los vasos. — Presiones sobre los cuerpos sumergidos. — Condiciones de equilibrio de los líquidos graves 109

Existencia de las presiones en los líquidos graves en equilibrio 109
Teorema fundamental 110
Condiciones de equilibrio de un líquido grave 111

Presiones sobre las paredes de los vasos 112

Presiones sobre el fondo plano y horizontal de un vaso 112
Comprobación experimental 112
Presiones sobre una pared plana lateral 114
Centro de presión 115
Presiones sobre el conjunto de las paredes de un vaso 116
Paradoja hidrostática 118
Vasos de reacción 118

Presiones sobre los cuerpos sumergidos 120

Principio de Arquímedes 120
Recíproca del principio de Arquímedes. 122
Demostración sencilla del principio de Arquímedes : experimento de M. Boudréaux 122
Determinación del volumen de un cuerpo. 123
Equilibrio de los cuerpos sumergidos y de los cuerpos flotantes 123
Condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes. — Metacentro 124
Ludión 125
Natación 126

Condiciones de equilibrio de los líquidos graves 126

Equilibrio de un líquido en un solo vaso. 126
Equilibrio del mismo líquido en un sistema de vasos comunicantes 127
Equilibrio de los líquidos superpuestos. 128
Equilibrio de los líquidos heterogéneos en dos *vasos comunicantes* 130

Cap. III. — Aplicaciones de los principios de hidrostática 131

Determinación de las densidades y pesos específicos. — Areómetros. — Aplicaciones diversas 131

Determinación de las densidades 131

Definiciones generales 131
Determinación de las densidades ó pesos específicos 134
Densidad de los sólidos 135
Casos particulares de la densidad de los sólidos 138
Densidades de los líquidos 139

Areómetros 141

Diferentes tipos de areómetros 141
Areómetros de Baumé 141
Areómetro de Cartier 143
Alcoholímetro centesimal de Gay-Lussac. 143
Extensión de la graduación centesimal à los pesa-sales, pesa-leches, pesa-vinos y pesa-orinas 144
Graduación por comparación 145
Densímetros y volúmetros 146

Aplicaciones diversas 147

Nivel de agua 147
Nivel de burbuja de aire 148
Aguas corrientes. — Saltos de agua. — Pozos artesianos 151

LIBRO IV

NEUMÁTICA.

Cap. I. — Estática de los gases 154

Presión atmosférica y barómetros 154

Caracteres físicos y propiedades de los gases 154
Estática de los gases 156
Estudio de la presión atmosférica 157
Medida de la presión atmosférica : experimento de Torricelli 159
Comprobación de Pascal 160
Valor de la presión atmosférica en kilogramos 160
Clasificación de los barómetros 161
Barómetro de cubeta 161
Barómetro de nivel invariable 162
Barómetro de Fortin 162
Barómetro de sifón 165
Barómetro normal 167
Perfeccionamiento de A. Leduc 168
Barómetros de la oficina internacional de pesas y medidas 168
Correcciones barométricas 169
Construcción de los barómetros 171
Previsión del tiempo por medio del barómetro 173
Barómetro de cuadrante 173
Medida de las alturas con el barómetro ó nivelación barométrica 174
Barómetros metálicos ó aneroides 175

Cap. II. — Estática de los gases..... 178

Principio de Arquímedes y aerostatos. 178

Extensión del principio de Arquímedes á los gases..... 178
Experiencia del baróscopo..... 178
Consecuencias del principio de Arquímedes : pesos reales y pesos aparentes. — Corrección de las pesadas hechas en el aire..... 179
Consecuencias del principio de Arquímedes : Equilibrio de los cuerpos sumergidos en la atmósfera..... 180
Aerostatos : montgolfieras y globos.... 180
Teoría de los aerostatos. — Fuerza ascensional..... 184
Paracaídas..... 186
Navegación aérea ó dirección de los globos..... 186
Globos tripulados y globos no tripulados. — Sondas aéreas de Renard... 189

Cap. III. — Compresibilidad de los gases..... 190

Ley de Mariotte. — Caso general de la compresibilidad. — Manómetros. 190

Ley de Mariotte..... 190
Expresiones analíticas de la ley de Mariotte..... 193
Estudio crítico de la ley de Mariotte. — Experiencias anteriores á las de Regnault..... 193
Experiencias de Regnault..... 193
Experiencias posteriores á las de Regnault..... 196
Compresibilidad á las diversas temperaturas..... 199

Manómetros..... 201

Definiciones..... 201
Manómetro de aire libre ordinario..... 202
Pequeño manómetro de aire libre..... 203
Manómetro barométrico ó barómetro diferencial de Regnault..... 204
Gran manómetro de aire libre de la torre Eiffel..... 205
Manómetro de líquidos menos densos que el mercurio..... 205
Manómetro llamado de Desgoffe..... 205
Manómetro de émbolos libres y líquidos viscosos de Amagat.....t..... 206
Manómetro de aire comprimido..... 206
Manómetros de gases comprimidos para las grandes presiones..... 207
Manómetros metálicos. — Manómetro de Bourdon..... 207
Manómetros de M. Cailletet..... 209
Volumenómetro..... 209

Cap. IV. — Expansibilidad de los gases. 210

Difusión y disolución..... 210

Mezcla de los gases ó difusión..... 210
Leyes de la mezcla de los gases..... 211
Disolución ó absorción de los gases por los líquidos..... 212
Estudio experimental de la solubilidad..... 213

Cap. V. — Aplicaciones de la expansibilidad de los gases..... 214

Máquinas neumáticas..... 214

Máquina neumática ordinaria..... 214
Límite del vacío..... 220
Llave de Babinet ó llave de doble agotamiento..... 221
Usos de la máquina neumática. Experiencias clásicas..... 223
Máquina neumática de Bianchi..... 225
Máquina neumática de Deleuil..... 226
Bomba neumática de E. Carré..... 226

Máquinas neumáticas de mercurio.... 228

Principio y generalidades..... 228
Máquina de Alvergniat (modelo primitivo)..... 228
Máquina de Alvergniat (nuevos modelos)..... 228

Cap. VI. — Aplicaciones de la elasticidad de los gases..... 230

Bombas de compresión. — Trompas aspirantes é insuflantes. — Aplicaciones del aire comprimido..... 230

Máquinas de compresión..... 230
Bomba de mano..... 230
Máquina de compresión de Regnault... 231
Bomba Cailletet..... 233
Teoría de las máquinas de compresión..... 233
Límite de la condensación..... 234

Trompas aspirantes é insuflantes..... 235

Definiciones. — Principios..... 235
Pequeña trompa de agua de Alvergniat..... 236
Aspirador de Sprengel : bomba-trompa de Alvergniat..... 236
Aspirador ordinario de Sprengel..... 237
Máquina insuflante ó trompa de agua.. 237
Aplicaciones del aire comprimido y del aire enrarecido..... 239
Fusil de viento..... 239
Correo neumático..... 240
Relojes neumáticos..... 240
Frenos automotores. — Frenos Westinghouse..... 241
Caminos de hierro atmosféricos..... 241
Motores de aire comprimido..... 242
Máquinas perforadoras..... 242
Trabajos submarinos : campana de buzo, aparato Triger, escafandra..... 243

LIBRO V

COMPLEMENTOS : NOCIONES DE HIDRODINÁMICA. — COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS. — NOCIONES DE CAPILARIDAD.

CAP. I. — NOCIONES DE HIDRODINÁMICA... 245

Principio de Torricelli y aplicaciones. —Bombas y sifones..... 245

Principio de Torricelli : Enunciado y fórmula..... 245
Demostración del principio..... 246
Demostración experimental de la fórmula de Torricelli..... 256
Vaso de Mariotte..... 248
Salida de un líquido en contacto con una masa limitada de aire..... 249
Pipeta..... 250
Fuente intermitente..... 250
Bombas..... 251
Bombas aspirantes..... 252
Bomba aspirante y elevadora..... 253
Esfuerzo y trabajo necesarios para manejar la bomba aspirante..... 254
Bomba aspirante de volante..... 254
Bombas impelentes..... 254
Bombas aspirantes é impelentes..... 255
Bombas oscilantes. — Bomba de Bramah..... 256
Bombas de salida continua..... 256
Máquinas elevadoras ó máquinas de agotamiento..... 258
Fuente de Héron..... 258
Máquina de Schemnitz..... 258
Sifones..... 259
Teoría completa del sifón..... 261
Sifón de salida constante..... 261
Sifón intermitente ó vaso de Tántalo... 262
Fuentes intermitentes naturales..... 263

CAP. II. — COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS..... 263

Coeficiente de compresibilidad..... 263
Piezómetro y experiencias de Œrsted... 264
Leyes de la compresibilidad de los líquidos..... 265

CAP. III. — NOCIONES DE CAPILARIDAD.... 267

Fenómenos capilares : definiciones..... 267

I. — *Fenómenos producidos en contacto de los sólidos por los líquidos que los mojan*..... 268

Leyes de la ascensión de los líquidos en los tubos capilares..... 268
Ley de la ascensión de los líquidos entre dos láminas paralelas..... 269
Ley de la ascensión de los líquidos entre dos láminas inclinadas..... 270
Demostración de las leyes. — Experiencias de Gay-Lussac..... 270
Experiencias de Eduardo Desains..... 270
Influencia de la temperatura. — Experiencias de M. Wolf..... 271
Tensión superficial. — Constante capilar..... 271
Origen de la tensión superficial. — Cohesión de los líquidos. — Estado de la capa superficial..... 272
Consecuencias de la tensión superficial. — Presión capilar. — Fórmula de Laplace..... 273
Demostración de la fórmula de Laplace. — Experiencias de Plateau..... 274

II. — *Fenómenos producidos en contacto de los cuerpos sólidos por los líquidos que no los mojan*..... 275

Contacto de los líquidos y de los sólidos. — Ángulo de conjunción..... 275
Estudio experimental del ángulo de conjunción..... 275
Leyes de la depresión de los líquidos en los tubos capilares y entre las caras paralelas..... 276
Consecuencias relativas á la corrección barométrica. — Construcción de las tablas de corrección..... 276

III. — *Fenómenos capilares diversos. — Aplicaciones*..... 277

Longitud de la columna líquida suspendida en un tubo abierto..... 277
Formación de las gotas en un orificio capilar. — Ley de Tate. — Teoría del cuentagotas..... 278
Excepción á las leyes del equilibrio de los cuerpos flotantes..... 278
Movimiento de las gotas en los tubos capilares cónicos..... 279
Atracciones y repulsiones de los cuerpos flotantes..... 280
Experiencia de Lippmann. — Fenómenos electrocapilares..... 280
Aplicación de la capilaridad á los areómetros..... 280

LIBRO VI

ACÚSTICA.

Cap. I. — Producción, propagación y reflexión del sonido 282
Objeto de la acústica. — Sonidos y ruidos 282
Causa del sonido 282
El sonido no se propaga en el vacío 283
El sonido se propaga en todos los cuerpos elásticos 284
Velocidad del sonido en los gases 284
Cálculo de la velocidad del sonido en los gases. — Fórmula de Newton. — Corrección de Laplace 285
Velocidad del sonido en los líquidos y los sólidos 286
Modo de propagación del sonido en el aire : Idea sintética del fenómeno 287
Propagación del sonido en el aire : análisis del fenómeno 288
Reflexión del sonido 290
Ecos y resonancias 291
Refracción del sonido 293
Circunstancias que alteran la intensidad del sonido 294
Reforzamiento del sonido por los tubos 294
Speaking-tubes 295
Bocina 295
Trompeta acústica 295
Audífono 296
Estetoscopio 299

Cap. II. — Elevación del sonido 297

Medida del número de vibraciones 297
Cualidades del sonido musical 297
Métodos diversos para medir el número de las vibraciones 298
Método acústico. — Sirena de Cagniard de Latour 298
Sirena de Seebeck 300
Fuelles 300
Rueda dentada de Savart 301
Límite de los sonidos perceptibles 301
Método gráfico. — Vibroscopio de Duhamel 302
Fonautógrafo 303
Fonógrafo 304
Fonógrafo perfeccionado 305
Grafofono 306

Clasificación de los sonidos musicales. — Teoría de la escala 307
Clasificación de los sonidos. — Intervalos musicales 307
Acordes : acordes consonantes y disonantes. — Acordes perfectos 308
Armónicos 309
Escala musical. — Gama 309
Intervalos sucesivos de las notas : tonos y semi-tonos 310
Gama natural. — Transposición musical. — Sostenidos y bemoles 310
Gamas menores. — Tonos relativos 312
Gama cromática. — Temperamento 313
Diapasón 313
Notación de las diversas gamas naturales. — Números absolutos de vibraciones 314
Límites de la escala musical 315

Cap. III. — *Vibraciones de las cuerdas.* 315
Cuerdas vibrantes. — Definiciones 315
Sonómetro 316
Leyes de las vibraciones transversales 316
Nodos y líneas nodales. — Sonidos armónicos de las cuerdas 317
Vibraciones longitudinales de las cuerdas 318

Cap. IV. — *Vibraciones del aire en los tubos sonoros* 319
Tubos sonoros : Definiciones 319
Tubos de boca : Descripción y funcionamiento 319
Tubos de lengüeta : Descripción y funcionamiento 320
Leyes experimentales de los tubos sonoros 320
Nodos y vientres de vibración 322
Fórmulas de los tubos sonoros 323
Principio de las interferencias 324
Aplicación del principio de las interferencias á las ondas sonoras 325
Teoría de los tubos sonoros 326
Pulsaciones 327

Cap. V. — *Análisis y síntesis de los sonidos. — Timbre. — Percepción de los sonidos* 328
Análisis de los sonidos. — Método de Helmholtz : Resonancia y resonadores 328
Resonadores y Aparato analizador de Kœnig 329
Resultados generales. — Causa del timbre 331
Síntesis de los sonidos 332

Percepción de los sonidos 332
Descripción del oído 332
Mecanismo de la audición 333

LIBRO VII

ÓPTICA.

CAP. I. — *Propagación de la luz*..... 335

Definiciones generales..... 335
Óptica geométrica. — Óptica física.... 336

Dirección de la propagación..... 336

Ley de la propagación rectilínea..... 336
Teoría geométrica de las sombras..... 337
Aplicaciones..... 339
Imágenes suministradas por las pequeñas aberturas..... 339

Velocidad de propagación..... 341

Velocidad de la luz. — Historia y resultado..... 341
Método de Rœmer..... 341
Experiencias de M. Fizeau..... 342

Intensidad de la luz. — Fotometría.. 343

Definiciones..... 343
Método fotométrico. — Fotómetros..... 344
Fotómetro de Rumford..... 345
Fotómetro de Bunsen..... 345
Procedimiento fotométrico de M. Crova. 346
Brillo intrínseco de los focos de luz.... 346

CAP. II. — CATÓPTRICA..... 347

Reflexión especular y espejos planos.. 347

Reflexión especular. — Definiciones y leyes..... 347
Reflexión irregular ó difusión..... 348
Poderes reflectores y difusivos..... 348
Espejos..... 349
Formación de las imágenes por los espejos planos..... 349
Campo de un espejo plano..... 350
Imágenes virtuales é imágenes reales.. 351
Espejos estañados. — Imágenes múltiples..... 351
Imágenes múltiples dadas por dos espejos inclinados..... 352
Calidoscopio..... 353
Imágenes múltiples producidas por dos espejos paralelos..... 353
Problema del espejo giratorio..... 354
Aplicaciones de los espejos..... 355

Espejos curvos..... 355

Espejos esféricos. — Definiciones..... 355
Espejos cóncavos. — Estudio geométrico y experimental (caso de los rayos centrales)..... 356
Definición de los focos..... 356
Foco principal. — Definición y determinación..... 356
Caso de los puntos luminosos. — Focos conjugados..... 357
Caso de objetos luminosos : Construcción de las imágenes..... 359
Espejos convexos. — Estudio geométrico y experimental. (Caso de los rayos centrales)..... 361
Fórmulas de los espejos esféricos cóncavos de pequeña abertura..... 363
Discusión de la fórmula de los espejos cóncavos..... 365
Fórmulas de los espejos convexos de pequeña abertura..... 366
Caso de los objetos luminosos..... 366
Caso de los espejos de gran abertura. — Rayos marginales : aberración de esfericidad. — Cáusticas por reflexión. 367
Espejos parabólicos..... 367
Construcción y uso de los espejos aplanéticos..... 368

CAP. III. — DIÓPTRICA..... 368

Leyes de la refracción simple..... 368

Definiciones..... 368
Leyes de la refracción simple..... 370
Índice de refracción, índice inverso.... 371
Fenómenos debidos á la refracción..... 371
Ángulo límite. — Fenómeno de la reflexión total..... 372
Espejismo. — Explicación de Monge.... 373

Transmisión por los medios refringentes. — Láminas y prismas..... 374

Láminas de caras paralelas..... 374
Medida de los índices de refracción. — Método del Duque de Chaulnes..... 375
Prismas..... 376
Fórmulas del prisma..... 377
Estudio experimental de la desviación.. 378
Condición experimental de la desviación mínima..... 379
Condición de emergencia en los prismas. 380
Prismas de reflexión total..... 381
Focos de un prisma..... 382
Medida de los índices..... 383

Transmisión por los medios refringentes. — Lentes..... 385

Definiciones..... 385
Analogía física de una lente y de un prisma..... 385
Lentes delgadas convergentes : estudio geométrico y experimental..... 386
Focos : definición y determinación..... 387
Centro óptico..... 389

Ejes secundarios. — Focos conjugados secundarios 390
Determinación experimental de los focos. 391
Construcción de las imagenes 391
Lentes delgadas divergentes : Estudio geométrico y experimental 392
Discusión algébrica de la ecuación de los focos conjugados 394
Aberración de esfericidad 395
Aplanetismo 395
Lentes de escalones 396
Aberraciones debidas al grueso de las lentes 397
Nociones sobre las lentes gruesas. — Teoría de los rayos centrales 397
Puntos nodales 399
Planos principales 400

Cap. IV. — Cromática 401

Dispersión y acromatismo. — Análisis espectral 401
Descomposición de la luz blanca. — Espectro solar 401
Producción de un espectro puro. — Regla de Newton 403
Los colores del espectro son simples y desigualmente refrangibles 403
Recomposición de la luz blanca 404
Composición de la luz y color de los cuerpos. Teoría de Newton 406
Colores complementarios 407
Constitución del espectro solar : Espectro luminoso, calorífico y químico 407
Espectro luminoso : Poder luminoso de los diversos haces del espectro. — Experiencia de Draper 407
Espectro calorífico 407
Aberración de refrangibilidad 408
Efecto de aberración de refrangibilidad : Irisación de los objetos vistos á través de un prisma 408
Acromatismo 409
Teoría del acromatismo (rayos centrales). 409
Absorción de la luz por los medios transparentes 410

Rayas del espectro y análisis espectral. 411
Rayas del espectro 411
Espectroscopios 411
Espectroscopio ordinario 413
Espectroscopios de visión directa 414
Aplicaciones del espectroscopio. — Análisis espectral 414
rincipales descubrimientos del análisis espectral 415
Resumen de espectroscopia. — Espectros de diversos órdenes 415

Cap. V. — Instrumentos de óptica 417

Microscopios. — Instrumentos astronómicos. — Aparatos de proyección 417
Vidrio de aumento, lente ó microscopio simple 417
Corrección de las aberraciones. — Dobletes 419
Microscopio simple 420
Microscopio compuesto 420
Medida experimental d l aumento 421
Descripción del microscopio Nachet 422
Acromatismo del microscopio 424
Campo. — Diafragma. — Punto ocular. 425

Instrumentos de óptica astronómicos 425
Anteojos ó refractores. — Telescopios ó reflectores 425
Refractor ó anteojo llamado astronómico 426
Medida experimental del aumento 429
Método de Ramsden 429
Claridad en los anteojos 429
Instrumentos meridianos y ecuatoriales. 431
Ecuatorial acodillado 432
Anteojo terrestre 434
Anteojo de Galileo 435
Aplicaciones científicas de los anteojos terrestres : Arreglo del catetómetro 436
Telescopio de Newton 438
Telescopio de Foucault 439

Instrumentos ó aparatos de proyección. 440
Definiciones. — Linterna magica 440
Microscopio solar 441
Linternas de proyección 443
Palioramas ó aparatos de vistas fundentes 444

Cap. VI. — *Visión* 446
Estructura del ojo humano 446
Marcha de los rayos en el ojo 448
Línea visual. — Ángulo de las líneas visuales 449
Apreciación de la distancia y de la magnitud de los objetos 450
Visión única con los dos ojos 450
Causa del relieve aparente de los objetos. — Estereoscopio 450
Región insensible de la retina : Punctum cæcum 451
Persistencia de la impresión en la retina. 451
Contraste de los colores. — Ley de Chevreul 452
Distancia de la visión distinta 452
Acomodación 452
Vista normal. — Ojo emmetropo 453
Presbicia. — Espejuelos ó anteojos de vidrios convexos 453
Miopia. — Espejuelos ó anteojos de vidrios cóncavos 454
Hipermetropia 455
Astigmatismo 456
Diplopia 456
Acromatopsia ó Daltonismo 456
Oftalmoscopio 457

Cap. VII. — Nociones de óptica física.. 458
Doble refracción. — Interferencias. — Polarización..... 458
Doble refracción..... 458
Definiciones. — Preliminares..... 458
Ley de Brewster. — Cristales de un eje. 458
Rayo ordinario y rayo extraordinario.. 459
Cristales positivos y cristales negativos. 460
Leyes de la doble refracción en los cristales de un eje..... 460
Construcción de los rayos refractados: Regla de Huygens..... 460
Leyes de la doble refracción en los cristales de dos ejes..... 462
Interferencias..... 462
Principio de las interferencias. — Experiencia de los espejos de Fresnel.... 462
Explicación de las franjas de Fresnel. — Confirmación de la hipótesis de las ondulaciones..... 463
Necesidad de la existencia del éter 464
Origen de los colores del espectro..... 465
Valores numéricos de las longitudes de onda y de las vibraciones luminosas. 465
Otros fenómenos de interferencia: anillos de Newton..... 466
Otros fenómenos de interferencia: difracción y redes..... 466
Polarización..... 467
Definición experimental de la polarización..... 467
Causa de la polarización: vibraciones transversales del éter..... 469
Ley de Malus..... 469
Consecuencias de la ley de Malus. — Demostración experimental..... 470
Diversos procedimientos de polarización de la luz..... 470
Interferencia de las rayos polarizados.. 472
Aparatos de polarización..... 472
Aparato de Norremberg..... 472
Polarización rotatoria..... 473
Rotación del plano de polarización..... 473
Coloración producida por la polarización rotatoria..... 473
Poder rotatorio de los líquidos. — Experiencias de Biot..... 474
Aplicación de la polarización rotatoria... 475
Sacarimetría y sacarímetros: Principio y método. órganos esenciales..... 475
Sacarímetro de Soleil..... 476
Sacarímetro de penumbras..... 479
Análisis de la orina de los diabéticos... 479
Cap. VIII. — *Fotografía* 480
Definición. — Historia..... 480
Daguerrotipia..... 480
Descubrimientos posteriores á la daguerrotipia..... 481
Clasificación de los diversos procedimientos fotográficos..... 482
Procedimiento del colodión húmedo... 483
Procedimiento del gelatino-bromuro de plata..... 484
Operaciones accesorias. — Retocado del negativo..... 486
Sustitución del vidrio como soporte de la capa sensible. — Placas peliculares y películas..... 487
Material y manipulaciones fotográficas..... 487
Observaciones generales sobre el procedimiento del gelatino-bromuro de plata..... 491
Tirada de los positivos en papel: pruebas fotográficas..... 491
Procedimientos fotográficos: procedimiento del cloruro de plata..... 491
Otros procedimientos fotograficos..... 493
Procedimientos mecánicos..... 493
Fotografía instantánea..... 494
Fotocronografía..... 496
Otros resultados obtenidos por el medio de las impresiones muy rápidas..... 497
Ampliaciones fotográficas..... 498
Fotografía con luz artificial..... 498
Degradados fotográficos..... 499
Fotografía micrográfica..... 499
Fotografía ortocromática y heliocromia..... 500
La fotografía ortocromática. — Las placas isocromáticas..... 500
Fotografía ortocromática: Método de G. Lippmann..... 500
Fotografía de los colores..... 501
Fotografía de los colores: descubrimiento de F. Lippmann..... 501
Demostración experimental de la teoría..... 504

LIBRO VIII

CALOR.

Cap. I. — *Efectos generales. — Termometría*..... 505
Definición y origen del calor. — Hipótesis de las ondulaciones..... 505

Efectos generales : dilatación..... 505
Efectos generales : cambios de estado.. 507

Nociones elementales de termometría. 508

Temperatura : definiciones..... 508
Elección de las sustancias termométricas..... 508
Termómetro de mercurio..... 509
Graduación del termómetro : puntos fijos de la escala..... 510
Diferentes escalas termométricas..... 514
Cambio de posición del cero..... 515
Condiciones de sensibilidad..... 515
Termómetro de alcohol..... 515
Termómetros de líquidos incongelables. 516
Termómetro metálico de Breguet..... 517
Termómetros de máxima y de mínima. 517
Termómetros de Rutherford..... 517
Termómetro de máxima de Walferdin, ó termómetro de derrame..... 518
Termómetro de máxima y de mínima de Miller-Casella..... 519
Termómetro de inversión. — Tipo Negretti y Zambra. — Perfeccionamiento de M. Chabaud..... 520
Pirómetros..... 520
Termomultiplicador..... 522

Cap. II. — *Dilatación de los sólidos*... 523

Definiciones preliminares. — Coeficientes de dilatación..... 523
Fórmulas relativas á las dilataciones de los sólidos..... 524
Medida de los coeficientes de dilatación lineal. — Experiencias de Lavoisier y Laplace..... 525
Método del comparador..... 526
Resultados generales relativos á la dilatación de los sólidos..... 527
Dilatación de los cristales. — Dilatómetro de Fizeau..... 527
Aplicaciones de la dilatación de los sólidos. — Péndulos compensadores... 528
Compensador Graham..... 530
Láminas compensadoras. — Compensador Martin..... 530

Cap. III. — *Dilatación de los líquidos.* 531

Definiciones preliminares..... 531
Dilatación absoluta del mercurio : Experiencias de Dulong y Petit..... 532
Coeficiente de dilatación aparente del mercurio : Experiencias de Dulong y Petit..... 533
Termómetro de peso..... 534
Coeficiente de dilatación del vidrio.... 535
Coeficiente de dilatación de los diversos líquidos..... 535
Máximum de densidad del agua..... 536
Cambio del máximum de densidad por efecto de la presión. — Experiencias de Amagat..... 537
Máximum de densidad de las soluciones salinas..... 537
Aplicación del termómetro de peso á la medida de las dilataciones cúbicas... 537

Cap. IV. — *Dilatación de los gases*... 538

Experiencias de Gay-Lussac..... 538
Fórmulas generales relativas á la dilatación de los gases..... 540
Experiencias de Regnault : generalidades y resultados..... 542
Experiencias de Regnault : Dilatación bajo presión constante..... 543
Experiencias de Regnault : Dilatación dado un volumen constante..... 545
Experiencias de Regnault : Dilatación dados volumen y presión variables... 547
Experiencias de Amagat : Leyes generales..... 548

Cap. V. — *Aplicaciones de la dilatación de los gases*..... 549

Termómetro de gas. — Termometría de precisión. — Densidades de los gases..... 549

Falta de comparabilidad de los diferentes termómetros..... 549
Elección de la sustancia termométrica.. 550
Principios de la termometría de precisión. 550
Termómetros de mercurio..... 551
Comparación del termómetro de aire normal con el termómetro de mercurio normal..... 552

Densidad de los gases..... 552

Definición. — Método general de determinación..... 552
Método de Regnault..... 553
Densidad de los gases que atacan el cobre. 554
Nuevas experiencias de M. A. Leduc.. 554
Determinación del peso del litro de aire normal..... 555

Cap. VI. — *Cambios de estado de los cuerpos*..... 556

Fusión y solidificación..... 556

Leyes de la fusión..... 556
Calor de fusión : trabajo consumado... 557
Fusión acuosa ó disolución..... 558
Solidificación : definición y leyes..... 558
Cristalización..... 558
Formación del hielo..... 559
Cambios de volumen debidos á los cambios de estado físico. — Fuerza expansiva del hielo. 559
Excepciones á las leyes de la fusión y de la solidificación : Influencia de la presión exterior..... 560
Solidificación de los líquidos por la presión. — Experiencias de M. Amagat. 561

Rehielo..... 562
Excepciones á las leyes de la solidificación : Sobrefusión..... 563
Aplicaciones de la presión acuosa. — Mezclas frigoríficas..... 564

Cap. VII. — *Vaporización en el vacío.* 565

Tensión máxima de los vapores..... 565

Definiciones..... 565
Formación de los vapores en el vacío.. 566
Vapores saturantes ó saturados. — Tensión máxima..... 566
Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua por bajo de cero. — Experiencias de Gay-Lussac..... 567
Principio de Watt ó de la pared fría... 568
Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua entre cero y 100°. — Experiencias de Dalton..... 569
Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua entre cero y 50°. — Experiencias de Regnault..... 569
Determinación de las tensiones máximas del vapor de agua por encima y por debajo de cero. — Experiencias de Regnault..... 570
Tensiones máximas de los vapores de diversos líquidos..... 572
Tensiones máximas de las disoluciones salinas ó ácidas..... 572

Cap. VIII. — Cambio de estado de los cuerpos..... 572

Ebullición y evaporación..... 572
Ebullición..... 572
Ebullición : Definición y descripción del fenómeno..... 572
Leyes de la ebullición..... 573
Determinación de los puntos de ebullición..... 575
Influencia de las sustancias en disolución..... 575
Influencia de la naturaleza de las paredes de los recipientes..... 575
Influencia de la ausencia de aire ó de gas disuelto..... 575
Influencia de la presión sobre la temperatura de ebullición..... 576
Aplicación : nivelación hipsométrica ó medida de las alturas con el hipsómetro..... 577
Aplicación : Marmita de Papin ó digestor..... 578
Calor de vaporización..... 578
Liquefacción ó condensación de los vapores. — Restitución del calor de vaporización..... 579
Aplicación de la ebullición. — Ensayo de los vinos por destilación : Alambique de Salleron..... 580

Evaporación..... 580
Definición del fenómeno..... 580
Casos particulares de evaporación..... 580
Circunstancias que aceleran la evaporación..... 581
Frío debido á la evaporación..... 581
Aplicación del frío producido por la evaporación..... 582

Estado esferoidal ó calefacción..... 582

Definición ó historia..... 582
Ausencia de contacto..... 583
Forma de las gotas..... 584
Temperatura del líquido..... 584
Temperatura de las plaças..... 585
Explicación del estado esferoidal..... 585

Cap. IX. — *Liquefacción y solidificación de los gases y de los vapores*..... 586

Historia. — Distintos procedimientos.. 586
Experiencias de Cailletet..... 588
Experiencias de Raúl Pictet..... 590
Experiencias de Wroblewski y Olszewski. 590
Temperatura crítica de los gases. — Experiencia de Andrews..... 591
Explicación del punto crítico..... 592
Curva de las densidades..... 593
Leyes de los estados correspondientes.. 593

Cap. X. — *Densidades de los vapores. — Mezcla de los gases y de los vapores*..... 594

Densidad de los vapores secos. — Métodos de determinación..... 594
Método de Gay-Lussac : Procedimiento de Hofmann..... 595
Método de Dumas..... 596
Densidades de los vapores saturados... 597
Observación de E. Mathias sobre las densidades y los pesos específicos de los líquidos..... 598

Mezcla de los gases y de los vapores..... 598

Mezcla de los gases y de los vapores. — Leyes de Dalton..... 598
Fórmulas relativas á las mezclas de gas y de vapores..... 600

Cap. XI. — *Higrometría*..... 601

Definiciones preliminares..... 601
Higrómetro químico..... 602
Higrómetro de cabello..... 603
Tabla de graduación de Gay-Lussac.... 603
Higróscopos..... 605
Higrómetros de condensación..... 606
Higrómetro de Daniell..... 607
Higrómetro de Regnault..... 608
Higrómetro de Alluard..... 608
Psicrómetro..... 609
Fórmulas relativas á la higrometría.... 610

Cap. XII. — Calorimetría..... 611

Calores específicos de los cuerpos sólidos y líquidos. — Calores específicos de los gases..... 611
Definiciones preliminares..... 611
Calores específicos..... 611
Principios fundamentales de la calorimetría..... 611
Capacidad calorífica ó valor en agua de un cuerpo..... 612
Diversos métodos calorímetros..... 612
Método de las mezclas. — Calorímetro de agua..... 613
Crítica del método de las mezclas. — Correcciones usuales..... 614
Calorímetro de Berthelot..... 615
Método de la fusión del hielo..... 616
Método del calorímetro de hielo (de Bunsen)..... 617
Métodos calorimétricos de temperatura constante..... 618
Método del enfriamiento..... 619
Calores específicos de los sólidos y de los líquidos : Resultados generales... 621
Fórmulas empíricas. — Calor específico medio y calor específico exacto..... 621
Leyes relativas á los calores específicos de los átomos..... 622
Calor específico de las disoluciones salinas dilatadas..... 623

Calores específicos de los gases..... 623
Definiciones..... 623
Determinación del calor específico de los gases (bajo presión constante)... 624
Resultados generales..... 626

Calores de fusión y de vaporización.. 627
Calor de fusión : Definición y métodos de medida..... 627
Método de las mezclas..... 627
Experiencias de Person..... 627
Calor de fusión del hielo..... 628
Calor de vaporización..... 628
Experiencias de Despretz..... 629
Calor total de vaporización. — Fórmulas empíricas de Regnault..... 630
Calor de vaporización de los gases líquidados..... 630
Calor emitido en las reacciones químicas. — Calor de combustión..... 633
Bomba calorimétrica de M. Berthelot.. 633
Pirheliómetro (de Pouillet)..... 633

Cap. XIII. — *Conductibilidad calorífica de los sólidos, de los líquidos y de los gases*..... 634
Propagación del calor por conductibilidad 634
Conductibilidad de los sólidos..... 635
Coeficientes de conductibilidad. — Teoría de Fourier..... 635
Experiencias de Despretz..... 636
Experiencias de Wiedemann y Franz... 637
Conductibilidad de los líquidos..... 637
Experiencias de M. A. Berget..... 638
Conductibilidad de los gases..... 639
Transporte..... 639

Cap. XIV. — Calor radiante..... 640

Propagación del calor por radiación.. 640
Definiciones preliminares..... 640
Caracteres físicos de la radiación..... 641
Intensidad del calor radiante y de la luz. — Leyes..... 641
Velocidad de enfriamiento : Ley de Newton..... 643
Equilibrio móvil de temperatura ó Hipótesis de Prevost..... 643

Reflexión y difusión. — Poderes reflector y difusivo. — Poderes absorbente y emisivo..... 644
Reflexión del calor radiante. — Leyes.. 644
Espejos ustorios..... 646
Reflexión aparente del frío..... 647
Reflexión irregular, ó difusión del calor radiante..... 647
Poder reflector..... 647
Poder difusivo..... 648
Poder absorbente..... 648
Poder emisivo..... 649
Comparación de los poderes absorbentes con los emisivos..... 650
Aplicaciones..... 651
Poderes diatermanos..... 651
Resultados relativos á los poderes diatermanos..... 652
Diatermaneidad de los gases..... 653
Consecuencias y aplicaciones de los poderes diatermanos..... 653
Análisis de las radiaciones caloríficas. — Termocrosis..... 654

Cap. XV. — *Aplicación de las leyes del calor. — Calefacción y ventilación*. 654
Diferentes clases de calefacción..... 654
Chimeneas..... 654
Tiro de las chimeneas..... 655
Hornillos..... 656
Calefacción por el vapor..... 657
Calefacción por el aire caliente..... 657
Calefacción por circulación de agua caliente..... 658

Cap. XVI. — *Nociones elementales de termodinámica*..... 660
Calor producido ó absorbido por las acciones mecánicas..... 660
Correlación entre el calor y el trabajo.. 662
Principio de la equivalencia del calor y del trabajo..... 662
valente mecánico de la caloría y

equivalente calorífico del kilográmetro. 662
Determinación del equivalente mecánico del calor : Métodos directos de determinación 662
Diversas formas de producción y de expresión del trabajo 662
Experiencias de Joule 664
Métodos indirectos 665
Determinación de $\frac{C}{c}$ 666
Principio de Carnot 669
Ciclo de Carnot 670
Temperaturas absolutas 670
Trabajo muscular y calor animal 671

Cap. XVII. — *Máquinas térmicas* 672
Definiciones 672
Generadores de vapor 672
Caldera de hervideros 673
Calderas semi-tubulares 673
Calderas tubulares 673
Calderas llamadas de generación instantánea 676
Calderas locomóviles 676
Máquinas de vapor propiamente dichas. 676
Mecanismo de la máquina de balancín. 677
Órganos accesorios de las maquinas de vapor 680
Rendimiento de las máquinas de vapor. 682
Expansión del vapor. — Máquinas de simple expansión : Sistema Clapeyron. 682
Perfeccionamientos introducidos en las máquinas de vapor 683
Perfeccionamiento en el mecanismo de las máquinas de simple expansión... 683
Máquina de vapor horizontal fija 686
Perfeccionamientos introducidos en los condensadores 687
Máquinas marinas 687
Corredera de Stephenson 688
Máquinas locomotoras 688
Locomóviles 690
Máquinas de aire caliente 691
Motores de gaz 693
Cálculo del trabajo suministrado por los motores térmicos 696
Freno de Prony 696
Indicador de presión 697

LIBRO IX

MAGNETISMO.

Cap. I. — *Propiedades de los imanes* .. 699
Imanes naturales, imanes artificiales : definiciones 699
Polos y línea neutra. — Puntos consecuentes 699
Agujas imantadas 700
Distinción de los polos 700
Acciones mutuas de los polos 701
Teoría del magnetismo 701
Fuerza coercitiva 702
Distinción de las sustancias magnéticas y de los imanes 703
Imantación por influencia. — Fantasmas magnéticos 703
Líneas de fuerza y campo magnético... 704
Leyes de las atracciones y de las repulsiones magnéticas 705
Fórmula de las leyes de Coulomb. — Unidad de magnetismo 705
Intensidad de un campo magnético.... 706
Campo magnético uniforme 706
Definición precisa de los polos 706
Momento magnético de una barra imantada. — Intensidad de imantación.... 706
Experiencias de Gauss. — Demostración de la ley de Coulomb 707
Potencial magnético 707
Acción de los imanes sobre todos los cuerpos. — Sustancias diamagnéticas 708

Cap. II. — *Magnetismo terrestre* 708
Brújulas de declinación y de inclinación. 708
Acción de la tierra sobre los imanes. — Par terrestre 708
Dirección del par terrestre. — Meridiano magnético. — Declinación é inclinación 709
Medida de la declinación y de la inclinación 710
Principio de los métodos de medida : Descomposición del par terrestre 710
Brújula de declinación 711
Causas de error y correcciones : Método de inversión 712
Brújula marina 713
Variaciones de la declinación 714
Brújula de inclinación 714
Variaciones de la inclinación 716
Medida de la intensidad del magnetismo terrestre 716
Momento magnético de las barras imantadas 717
Aguja y sistema astáticos 717

Cap. III. — *Distribución del magnetismo en las barras imantadas. — Procedimientos de imantación* 718
Distribución del magnetismo 718
Experiencias de Coulomb 718

Procedimientos de imantación..... 719
Manantiales de imantación y métodos.— Saturación..... 719
Imantación por los imanes..... 719
Imantación por acción de la tierra..... 721
Imanes compuestos ó Haces magnéticos. 721
Armaduras de los imanes..... 722
Fuerza portátil de los imanes..... 723
Imanes Jamin..... 724

LIBRO X

ELECTRICIDAD ESTÁTICA.

CAP. I. — *Principios fundamentales*... 725
Definiciones. — Historia..... 725
Electroscopios..... 726
Conductibilidad eléctrica..... 727
Cuerpos buenos conductores y cuerpos malos conductores..... 727
Aisladores, depósito común..... 728
Distinción de dos electricidades..... 728
Producción simultánea de las dos electricidades..... 729
Electrización por frotamiento..... 730
Equivalencia de las electricidades contrarias desarrolladas simultáneamente. 730
Influencia eléctrica..... 730
Teoría de la electrización..... 731

CAP. II. — *Medida de las fuerzas eléctricas. — Leyes de Coulomb*..... 732
Leyes de las atracciones y de las repulsiones eléctricas..... 732
Demostración experimental de las leyes de Coulomb..... 732
Demostración de la ley de las masas... 735
Ley elemental de las acciones eléctricas. 735
Expresión matemática de la ley de Coulomb. — Unidad de canditad de electricidad ó Unidad de carga eléctrica. — Coulomb..... 736
Fuerza eléctrica. — Campo eléctrico... 737
Componentes de la fuerza en un punto del campo eléctrico..... 737

CAP. III. — *Distribución y pérdida de la electricidad*..... 738
Distribución de la electricidad en la superficie de los cuerpos conductores.. 738
Densidad eléctrica..... 739
Experiencias de Coulomb..... 740
Acción de un conductor cargado de electricidad en equilibrio..... 741
Acción protectora de un recinto conductor. — Cámara de Faraday..... 742
Comunicación y distribución de la electricidad sobre los cuerpos en contacto. 742
Pérdida de la electricidad..... 743

CAP. IV. — *Consecuencias de las leyes de Coulomb. — Nociones fundamentales sobre el potencial eléctrico*.... 743
Potencial de un conductor electrizado : Definición experimental..... 743
Definición matematica del potencial eléctrico en un punto..... 745
Propiedades del potencial..... 745
Potencial en un punto debido á un sistema cualquiera de masas eléctricas.. 748
Superficies equipotenciales ó superficies de nivel..... 749
Líneas de fuerza..... 749
Condicion de equilibrio eléctrico en un conductor..... 749
Potencial de los conductores electrizados. 750
Expresión de la densidad en un punto de un conductor electrizado en equilibrio..... 751
Flujo de fuerza..... 751
Teorema de Gauss..... 752
Aplicaciones..... 753
Conductores electrizados comunicantes. 754
Capacidad eléctrica..... 754
Unidades de capacidad eléctrica : unidad absoluta (C. G. S.) y unidad práctica. 755
Distribución de la electricidad entre diversos conductores. — Ecuaciones del equilibrio eléctrico..... 755
Consecuencias y casos particulares.... 756
Calculo de la energía necesaria para cargar un conductor á un potencial determinado..... 756

CAP. V. — *Influencia electrostática*.... 757
Influencia en los cuerpos conductores.. 757
Cantidad de electricidad inducida : teorema de Faraday..... 759
Influencia de una superficie electrizada cerrada sobre un punto interior..... 761
Consecuencias del teorema de Faraday. 761
Influencia sobre los cuerpos malos conductores; penetración en su masa.... 761
Comunicación de la electricidad á distancia. — Descarga disruptiva y descarga conductiva..... 762
Movimientos de los cuerpos electrizados. 762
Teoría de la influencia electrostática... 763

CAP. VI. — *Condensación de la electricidad*..... 764
Estudio elemental y teoría..... 764
Condensación y condensadores..... 764
Condensador de Æpinus..... 765

Cuadro fulminante..... 767
Botella de Leyden..... 767
Distribución de la carga. — Experiencia de Franklin..... 769
Jarras y baterías eléctricas..... 769
Batería en cascada..... 772
Electroscopio condensador de Volta.... 772
Botella de Lane ó electrómetro de descargas..... 773
Teoría de la condensación eléctrica. — Caso del condensador esférico 774
Poder inductor específico. — Experiencias de Faraday..... 776
Condensadores ordinarios..... 776

Cap. VII. — *Máquinas eléctricas*..... 778

Definiciones y clasificación..... 778
Máquina eléctrica de Ramsden..... 778
Principio de las máquinas de influencia. — Historia..... 782
Electróforo (de Volta)..... 782
Máquina dieléctrica de Carré..... 783
Máquina eléctrica de Holtz..... 783
Máquina de Wimshurst..... 787
Observaciones sobre la teoría de las máquinas electrostaticas..... 791

Cap. VIII. — *Efectos de las máquinas eléctricas y de los condensadores. — Experiencias clásicas*..... 791

Efectos de las máquinas eléctricas... 791

Chispa eléctrica..... 791
Experiencias del taburete eléctrico..... 793
Campanario eléctrico..... 793
Molinete eléctrico, viento eléctrico..... 794
Reversibilidad de las maquinas eléctricas. 795

Efectos de los condensadores..... 795

Efectos diversos de las descargas eléctricas..... 795
Efectos fisiológicos..... 795
Efectos luminosos en los gases enrarecidos: resplandores y descargas en el huevo eléctrico..... 796
Efectos luminosos en el vacío: fenómenos de Crookes..... 796
Efectos luminosos ordinarios: Botella, tubo y cuadro fulminantes..... 797
Efectos caloríficos: Incandescencia é inflamación. Fusión y volatilización. — Retratos eléctricos..... 797
Efectos caloríficos: Termómetros de Riess..... 799
Efectos mecánicos..... 799
Efectos químicos..... 800

Cap. IX. — *Electroscopios y electrómetros*..... 801

Definiciones..... 801
Electroscopio de hojas de oro..... 801
Electrómetro de Henley..... 802
Balanza de Coulomb..... 802
Unidades de potencial; unidad absoluta, y unidad práctica (*volt*)..... 803
Electrómetro esférico absoluto de Lippmann..... 803
Electrómetro de cuadrantes..... 805
Electrómetro de M. E. Branly..... 805
Electrómetro capilar de Lippmann..... 807

LIBRO XI

ELECTRICIDAD DINÁMICA.

Cap. I. — *Pila voltaica*..... 810

Historia y generalidades..... 810

Pilas voltaicas..... 810
Historia de la pila..... 812
Distribución de los potenciales en la pila de Volta..... 813
Definiciones fundamentales..... 814

Cap. II. — *Conductibilidad eléctrica. — Leyes de Pouillet. — Fórmula de Ohm*..... 815

Definiciones..... 815
Ley de los conductores equivalentes.... 816
Consecuencias de la ley de los conductores equivalentes..... 816
Unidades de resistencia eléctrica: unidad absoluta y unidad práctica (Ohm). 818
Experiencias de Pouillet. — Ley de las corrientes termo-eléctricas..... 818
Ley de las corrientes hidro-eléctricas... 819
Constantes de un elemento voltaico.... 819
Reunión de las pilas..... 820
Constantes de una pila: Experiencias de Pouillet..... 821
Comparación entre los diversos modos de reunión..... 822
Teoría y fórmula de Ohm..... 823
Demostración experimental de la fórmula de Ohm..... 825
Fórmula de Pouillet..... 826
Aplicación de las fórmulas de Ohm: Problema de la derivación..... 826
Problema del shunt..... 827
Problema de los conductores equivalentes..... 828
Problema del puente..... 828

Ley de Joule y fenómeno de Foltier. — Potencia de la pila..... 829

Cap. III. — *Modificaciones de la pila de Volta. — Pilas de corriente constante*..... 829

Debilitación y variabilidad de la corriente en las pilas voltaicas..... 829
Pilas de corriente constante..... 830
Pila de Becquerel..... 831
Modificaciones del elemento Becquerel.. 832
Pila de Bunsen..... 832
Elemento Marié-Davy..... 833
Pila de bicromato y de dos líquidos.... 834
Pilas de un solo líquido con despolarizante líquido. — Pila de bicromato.. 834
Pila de un solo líquido, con despolarizante sólido. — Pila de Leclanche... 834
Pilas-tipos..... 836

Cap. IV. — *Diversos efectos de las corrientes continuas: efectos fisiológicos — Efectos químicos y electrolisis*.... 837

Efectos fisiológicos..... 837
Acciones sobre los nervios y los músculos..... 837

Efectos químicos. — Leyes de la electrolisis..... 838
Experiencia fundamental: descomposición del agua en el voltámetro..... 838
Leyes experimentales de la electrolisis.. 839
Electrolisis de los compuestos binarios. 840
Electrolisis de las sales..... 841
Leyes de Faraday..... 841
Trabajo absorbido por la electrolisis. — Fuerza electromotora de polarización. 842
Efectos secundarios de la electrolisis... 843
Teoría de Grothuss..... 843

Cap. V. — *Efectos mecánicos de las corrientes. — Electrodinámica*..... 844

Efectos mecánicos de las corrientes. — Acciones mutuas entre las corrientes eléctricas..... 844

Cambios de posición de las corrientes por acción de las corrientes..... 845
Leyes de las corrientes paralelas..... 845
Canmutador de Berlin..... 846
Leyes de las corrientes angulares..... 847
Ley de las corrientes sinuosas..... 848

Orientación de las corrientes por las corrientes..... 848
Acción de una corriente indefinida sobre otra perpendicular á su dirección.... 848
Consecuencias..... 849
Acción de una corriente rectilínea indefinida sobre otra rectangular ó circular. 850

Rotación de las corrientes por la acción de las corrientes..... 850
Rotación de una corriente horizontal finita por acción de otra rectilínea horizontal indefinida..... 850
Rotación de una corriente horizontal finita bajo la acción de una corriente circular horizontal..... 851
Rotación de una corriente vertical bajo la influencia de una corriente circular horizontal..... 851
Ley elemental. — Cálculo de Ampère... 852
Consecuencias..... 852

Corriente terrestre..... 853
Acción de la tierra sobre las corrientes. 853
Orientación de las corrientes verticales. 853
Rotación de las corrientes horizontales móviles alrededor de un eje vertical.. 854
Posición de la corriente terrestre..... 854
Orientación de las corrientes cerradas, móviles en torno de un eje vertical.. 855
Corrientes astáticas..... 855

Cap. VI. — *Efectos mecánicos de las corrientes*..... 856

Electromagnetismo..... 856
Efectos mecánicos de las corrientes sobre los imanes..... 856
Orientación de los imanes por las corrientes..... 856
Orientación de las corrientes por los imanes..... 857
Rotación de los imanes bajo la influencia de las corrientes..... 857
Rotación de las corrientes por acción de los imanes..... 858
Efectos de movimiento..... 859
Ley elemental. — Fórmula de Laplace.. 859
Diversas expresiones de la fórmula de Laplace. — Aplicaciones..... 859
Rotación electrodinamica y electromagnética de los líquidos..... 860

Solenoides..... 861
Solenoides y cilindros electrodinámicos. 861
Acción de las corrientes sobre los solenoides..... 862
Acción directora de la tierra sobre los solenoides..... 862
Acciones mutuas de los imanes y de los solenoides..... 862
Acciones mutuas de los solenoides..... 863
Experiencias de Weber. — Momento magnético de un carrete..... 863
Teoría de Ampère sobre el magnetismo. 863
Diferencia entre los solenoides y los imanes..... 864
Dirección de las corrientes de Ampère en los imanes..... 864
Corriente terrestre..... 864

Aplicaciones del electromagnetismo. — Sistema de las unidades eléctricas absolutas C. G. S. 865
Definiciones 865
Unidades absolutas C. G. S. electromagnéticas 865
Unidades electromagnéticas secundarias. 866

CAP. VII. — *Efectos físicos de las corrientes* 868

Imantación por las corrientes, electroimanes 868
Imantación por las corrientes 868
Procedimiento de imantación 868
Electroimanes 869
Magnetismo remanente 870
Definiciones fundamentales : Permeabilidad magnética. — Inducción específica. — Campo magnetizante. — Fuerza magnetomotora. — Reluctancia. — Circuito magnético. — Ampère-vuelta. — Histéresis 870
Cálculo de un electroimán 871
Sustancias diamagnéticas y sustancias paramagnéticas 871

CAP. VIII. — *Medida de la intensidad de las corrientes. — Galvanómetros y brújulas* 872

Métodos é instrumentos de medida 872
Galvanómetro ordinario 873
Galvanómetro de Thomson 875
Galvanómetro aperiódico Deprez-d'Arsonval 877
Galvanómetros absolutos : Brújula de las tangentes 877
Amperémetros. — Tipo Deprez. — Carpentier 878
Electrodinamómetros 879
Electrodinamómetro Pellat 879

Aplicaciones de los instrumentos de medida; medidas eléctricas 880

Shunt de los galvanómetros 880
Comparación de las resistencias 881
Medida de la resistencia interior de una pila 882
Comparación de las fuerzas electromotoras de dos pilas 883
Comparación de las fuerzas electromotoras de dos pilas en marcha 883

CAP. IX. — *Efectos caloríficos y luminosos de las corrientes voltaicas. — Termoelectricidad* 884

Fenómenos generales 884
Leyes de Joule 884
Origen del calor que se desprende en la pila 885
Asimilación de la pila eléctrica á una máquina térmica 885
Efectos luminosos 886
Arco voltaico : su constitución : su elevada temperatura 886
Aplicaciones del arco voltaico 888

Corrientes termoeléctricas 889

Definición. — Experiencia de Seebeck .. 889
Pares y Pilas termoeléctricas : Pilas de Pouillet, de Nobili, de Clamond 889
Serie termoeléctrica. — Poderes termoeléctricos de los metales. — Fenómeno de la inversión 891
Leyes de las fuerzas electromotoras termoeléctricas 891
Origen de las corrientes termo-eléctricas. — Efecto Peltier 892
Termomultiplicador 892
Pinzas termoeléctricas. Aguja termoeléctrica 894

CAP. X. — *Inducción electrodinámica.* 895

Definiciones 895
Inducción voltaica 895
Inducción magnética ó magneto-eléctrica 897
Ley de Lenz 898
Magnetismo de Arago ó magnetismo de rotación 898
Inducción telúrica 899
Inducción leyden-eléctrica 900
Inducción refleja y Extra-corrientes 900
Experiencias de Faraday 901
Propiedades de las corrientes inducidas. 901
Inducción en circuito abierto 902
Análisis experimental de la inducción .. 902
Unidad C. G. S. electromagnética de fuerza electromotora y unidad práctica (Volt) 903
Ley de Neumann 904
Coeficiente de inducción refleja y coeficiente de inducción mutua 904

CAP. XI. — *Aplicaciones de la inducción voltaica* 905

Carrete de Ruhmkorff y transformadores 905

Carrete de inducción de Ruhmkorff 905
Órganos accesorios del carrete de Ruhmkorff 907
Interruptor de mercurio (de Foucault) .. 908
Transformadores : tipo Zypernowski 909
Efectos del carrete de Ruhmkorff 909
Efluvio eléctrico 911
Aplicación del carrete de Ruhmkorff. — Cohete de Statcham 912

CAP. XII. — *Nuevas aplicaciones de la inducción. — Efectos de capacidad y de inducción refleja; descargas oscilantes* 913

Descargas oscilantes. — Definiciones ... 913

Experiencias de Feddersen y de M. Lodge. 913
Experiencias de M. Paalzow..... 913
Experiencias de M. Hertz..... 913
Experiencias de M. Tesla..... 914
Efectos fisiológicos de las descargas oscilantes..... 916
Experiencias de Elihu Thomson..... 916

Cap. XIII. — *Aplicaciones del electromagnetismo y de la inducción*..... 917

Máquinas y motores electromagnéticos. 917
Definiciones..... 917
Generalidades sobre las corrientes alternas..... 917
Máquina de Clarke..... 918
Máquina de Siemens..... 922
Máquina de Gramme de corrientes continuas..... 923
Máquina de Gramme de corrientes continuas: tipo de taller..... 925
Excitación de las máquinas de corriente continua..... 926
Nuevo tipo de máquina Gramme de corriente continua: Modelo Limb y Gianotti..... 928
Máquina de Gramme de corrientes alternas ó Máquina para luz..... 929
Reversibilidad de las máquinas dinamoeléctricas..... 930
Motores eléctricos. — Transporte de la energía mecánica..... 930
Estudio de rendimiento de los motores eléctricos..... 930
Transporte de la energía por las máquinas de corrientes alternas..... 931

Cap. XIV. — *Aplicaciones de la electrolisis*..... 932

Galvanoplastia y *electroquímica.* — *Acumuladores*..... 932
Definición..... 932
Galvanoplastia propiamente dicha..... 932
Electrotipia..... 934
Electroquímica. — Operaciones preliminares..... 935
Dorado galvanico..... 936
Plateado..... 937
Nickelado..... 937
Depósitos metálicos diversos..... 937
Manantiales de electricidad utilizados.. 938
Aplicaciones diversas..... 938

Acumuladores eléctricos..... 939
Pilas primarias y Pilas secundarias. — Acumuladores..... 939
Acumuladores y Baterías secundarias Planté..... 940
Baterías secundarias Planté..... 941
Formación de los acumuladores. — Modificaciones del acumulador Planté..... 941
Constantes de los acumuladores de plomo..... 942
Acumulador Peyrusson..... 942
Acumulador Gadot..... 942
Instrucción para conservar los acumuladores..... 943

Cap. XV. — *Aplicaciones industriales.* 944

Alumbrado eléctrico..... 944
Reguladores, bujías y lámparas eléctricas..... 944
Carbones usados para el arco voltaico.. 945
Fuerza electromotora del arco voltaico. 945
Regulador de Foucault y Dubosq..... 946
Regulador Serrin..... 947
Principio de los reguladores polifotos ó de división..... 947
Lámpara de arco Japy-Helmer..... 948
Bujía eléctrica Jablochkoff..... 949
Quemador Jamin..... 950
Lámparas eléctricas de incandescencia sin combustión..... 951
Lámpara Edison..... 952

Cap. XVI. — *Aplicaciones industriales.* 953

Telegrafía..... 953
Definiciones: telégrafos, telautógrafos y teléfonos..... 953
Historia y principio de los telégrafos eléctricos..... 953
Clasificación de los aparatos telegráficos..... 954
Órganos diversos de un telégrafo eléctrico..... 954
Hilo de línea..... 954
Regreso por el suelo..... 956
Generadores de corrientes..... 956
Pilas en cascada..... 957
Telégrafo de cuadrante ó de letras: sistema Bréguet..... 957
Telégrafos de señales registradas. — Sistema Morse y sus derivados..... 959
Instalación completa de una estación Morse. — Operación..... 962
Órganos accesorios..... 963
Refuerzos..... 964
Telégrafos impresores. — Principio del sistema Hughes..... 965
Telégrafos de transmisión rápida..... 965
Jacquard eléctrico..... 966
Transmisores múltiples. — Aparato Baudot..... 966
Sistemas duplex, diplex y cuadruplex... 966
Comparación de los diversos telégrafos en lo relativo á rapidez de transmisión..... 967

Telegrafía submarina..... 967
Anomalías de la transmisión en las líneas submarinas..... 967

Galvanómetro ó receptor de espejo (de Thomson) 968
Sifon-recórder de Thomson..... 968

Cap. XVII. — *Aplicaciones industriales*. 970

Telefonía..... 970
Definiciones y clasificación..... 970
Teléfono Bell..... 971
Otros teléfonos. — Teléfono Ader..... 972
Biteléfono Mercadier..... 973
Micrófono de Hughes..... 973
Teléfonos con pila : Transmisor micrófonico..... 974
Perfeccionamiento de Edison : Uso del carrete de inducción..... 975
Instalación completa de un puesto telefónico..... 976
Aplicaciones de los teléfonos de pila... 976
Fotofono de Graham Bell..... 977

METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA.

Cap. I. — *Metéoros*..... 979
Objeto de la meteorología..... 979

Metéoros aéreos..... 979
Vientos, su causa..... 979
Dirección y velocidad de los vientos.... 979
Vientos regulares ó alisios..... 980
Región de las calmas..... 981
Vientos periódicos, monzones, simún, brisa..... 981
Vientos variables..... 982
Ciclones..... 982
Tornados..... 983
Trombas..... 984

Metéoros acuosos..... 984
Nubes..... 984
Formación de las nubes..... 985
Lluvia. Pluviómetro..... 986
Nieblas..... 986
Rocío, sereno, escarcha..... 986
Nieve, granizo helado, verglas..... 987
Granizo..... 988

Metéoros eléctricos..... 988
Descubrimiento de la electricidad de la atmósfera por Franklin..... 988
Aparatos para apreciar la electricidad de la atmósfera..... 989
Electrómetro de Saussure..... 989
Colector de la electricidad atmosférica de Thomson..... 990
Electrómetro bifiliar de Palmieri..... 990
Distribución de la electricidad en la atmósfera y en las nubes..... 990
Relámpago..... 991
Ruido del trueno..... 992
Efectos del rayo..... 992
Pararrayos..... 993
Pararrayo-Melsens..... 994
Aurora boreal..... 995

Metéoros luminosos..... 996
Arco iris..... 996
Halos..... 996
Parhelios, círculos parhélicos, coronas.. 997

Cap. II. — *Climatología*..... 997
Temperatura media..... 997
Causas que modifican la temperatura del aire..... 998
Líneas isotérmicas..... 999
Climas..... 1000
Distribución de la temperatura en la superficie del globo..... 1001
Temperatura de los mares, corrientes marinas..... 1001
Temperatura de los lagos y de las fuentes 1002
Distribución de las aguas en la superficie del globo..... 1003

Cap. III. — *Previsión del tiempo*..... 1003
Observaciones meteorológicas..... 1003
Signos del tiempo..... 1003
Pronósticos derivados de los vientos y de los torbellinos..... 1003
Pronósticos sacados de la altura del barómetro..... 1004
Pronósticos sacados del termómetro y del higrómetro..... 1005
Pronósticos sacados de los movimientos de la aguja imantada..... 1006
Pronósticos suministrados por el espectroscopio..... 1006

Problemas..... 1007
Cuadros de los números útiles para la resolución de los problemas..... 1027

Paris. — Imprenta de la Vda de Ch. Bouret.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY
BERKELEY

THIS BOOK IS DUE ON THE LAST DATE STAMPED BELOW

Books not returned on time are subject to a fine of 50c per volume after the third day overdue, increasing to $1.00 per volume after the sixth day. Books not in demand may be renewed if application is made before expiration of loan period.

APR 2 1917
OCT 23 1919
DEC 23 1920
SEP 3 1920
MAR 8 1921
MAR 22 1921
APR 14 1921
DEC 23 1921
OCT 13 1922
NOV 1 1922

50m-7,'16

TC 22058

202535